

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**TRABAJO FIN DE MÁSTER**  
**Máster Universitario en Ingeniería de**  
**Telecomunicación**

**LTE PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

**Alberto Martín Hernández**

**FEBRERO 2016**



# **LTE PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD**

**AUTOR: Alberto Martín Hernández**

**TUTOR: Bazil Taha Ahmed**

**Radio-Frequency Circuits, Antennas and Systems (RFCAS)**

**Dpto. Tecnología Electrónica y Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Febrero de 2016**



**Resumen-** En la actualidad, una parte más que considerable de los presupuestos del estado en países desarrollados y en vías de desarrollo va destinada a las infraestructuras. En un mundo cada vez más globalizado y donde cada vez son más comunes los desplazamientos, tanto para ocio como negocios, se antoja necesario disponer de una buena red de comunicaciones tanto a nivel nacional como internacional. Es aquí donde cobra una especial importancia el transporte en tren de alta velocidad. Este tipo de transporte es considerado el más seguro del mundo y con sus velocidades comprendidas entre los 250 y 500 km/h compite con el avión en distancias medias. Cada vez se invierte más en este tipo de transporte y se fabrican cada vez más modernos y veloces. Sin embargo, las comunicaciones utilizadas en este medio de transporte se quedan atrás comparadas con la modernidad y calidad de los trenes utilizados. Es esta la principal razón de la realización de este trabajo. En este proyecto se propone sustituir las comunicaciones anticuadas actuales de los trenes por el estándar LTE. El estándar de cuarta generación está ampliamente incorporado en las redes a nivel nacional e internacional y su rendimiento está más que probado en redes de comunicaciones convencionales tanto a nivel urbano como rural consiguiendo capacidades pico en torno a los 100Mbps. Esto hace pensar que su aplicación en redes de trenes de alta velocidad sería una solución razonable y casi intuitiva, pero todo necesita un estudio previo. Con el fin de fundamentar este cambio, a lo largo de este trabajo, se realizará un estudio concienzudo de las razones de porqué se podría aplicar este cambio. Para ello, se implementará una serie de programas que permitirán realizar simulaciones sobre el rendimiento de estos sistemas. En su realización, es muy importante tener en cuenta todos los factores que afectan de alguna manera al transcurso de la señal y conocer bien todos estos aspectos. Con todo esto, una vez realizado el documento, se pretende que este trabajo sirva como referencia a futuros investigadores y diseñadores debido a los resultados y análisis que se van a llevar a cabo. En definitiva, que sirva como estudio preliminar consistente para la implementación de LTE en trenes de alta velocidad.

**Palabras clave-** LTE, 4G, comunicaciones móviles, trenes de alta velocidad, infraestructuras, Long Term Evolution, tasa binaria, simulación.

**Abstract-** Nowadays, developed and emerging countries are investing in infrastructures. In a world constantly being globalized, people are increasing their travels for business and leisure purposes. This is the main reason why it is necessary to have good communications inside and outside of countries. High speed railways can have a leading role in this task. This means of transport is considered the safest and can reach speeds ranging between 250 and 500km/h making it compete with airplanes over medium length distances. Each time there is greater investment in this form of transport and manufacturing processes become more modern and faster. However, the communications systems currently used are falling behind the modern standards. This is the main reason for making this project. This document proposes to substitute the actual communication systems in high speed railways for LTE standard. 4G standard is now used around the world and its quality and throughput is well known on both an international and national level and at urban and rural scale for reaching 100Mbps at peak rate. Applying LTE in high speed railway networks is a good solution for substituting the old communication systems but before doing so, a previous study is necessary. This study is going to be embodied throughout this document and the reasons behind it being a good solution will be revealed. In doing so, it is very important to understand and apply all the factors that affect the signal. As a conclusion, the content of this document aims to be a good reference for future researchers and designers due to the analysis and the results that are going to be carried out. In summary, this document aims to be a preliminary study for the future implementation of LTE in high speed railways.

**Key words-** LTE, 4G, cellular communications, High speed railways, infrastructures, Long Term Evolution, Binary rate, simulations.

## ***Agradecimientos:***

El trabajo que se presenta no habría sido posible sin todas aquellas personas que me han ayudado de manera directa o indirecta lo largo de su realización:

Muchas gracias a mi tutor, Bazil Taha, que sin su ayuda y guía no habría existido este TFM. Echaré de menos en el futuro las tardes de tutorías que hemos tenido a lo largo de este tiempo y que conseguían que desconectase del trabajo.

A Bárbara, por ser la compañera perfecta. Aguantar un carácter como el mío en tiempos malos no es nada fácil y ya van 5 años y medio.

A mi familia y amigos, que han permitido desconectar al llegar a casa y fuera de la universidad.

A los “Hipster”, que al fin y al cabo, han sido mis acompañantes de estos cinco años y medio. El tenerlos en clase ha hecho muchísimo más fácil todo esto.

Y por último, gracias a ti J. Sé que aún estás conmigo.





# INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos del Trabajo Fin de Máster .....	3
1.3	Fases de realización .....	4
1.4	Estructura del documento .....	4
2	Tecnología LTE y Trenes de Alta Velocidad .....	7
2.1	Introducción.....	7
2.2	Estándar LTE.....	7
2.2.1	Historia breve de las comunicaciones móviles: Cómo se ha llegado al 4G ...	7
2.2.1	LTE: Long Term Evolution.....	9
2.2.1.1	Multiplexación en LTE: Orthogonal Frequency Division Multiple Access..	9
2.2.1.1	Duplexación en LTE: FDD y TDD. ....	10
2.2.1.2	Modulaciones Downlink en LTE: QPSK, 16QAM y 64QAM. ....	11
2.2.1.3	Codificación en LTE: Turbo códigos. ....	13
2.2.1.4	Tabla MCS para LTE. ....	13
2.2.1.5	Resumen características LTE .....	14
2.3	Trenes de alta velocidad .....	15
2.4	Estado del arte .....	16
2.4.1	Estado de las comunicaciones en los trenes .....	16
2.4.2	Estudios relacionados .....	17
2.5	Conclusiones.....	18
3	Calculo de SINR y la Tasa Binaria.....	19
3.1	Introducción.....	19
3.2	Escenario de estudio y parámetros iniciales .....	19
3.2.1	Escenario básico y distancias del problema .....	19
3.2.2	Parámetros del problema .....	20
3.3	Modelo de propagación, interferencias y factores atenuantes. ....	21
3.3.1	Modelo de propagación .....	22
3.3.2	Interferencias .....	23
3.3.3	Factores atenuantes.....	27
3.4	Medidas de calidad de la señal: SNR y SINR .....	28
3.5	Cálculo de SNR, SINR y tasa binaria en recepción .....	30
3.6	Conclusiones.....	36
4	Resultados.....	37
4.1	Introducción.....	37
4.2	Segmentación de resultados .....	37
4.2.1	Paso de tasa neta bruta a tasa binaria neta real .....	37
4.2.2	De qué manera afecta la velocidad a la tasa binaria .....	40
4.2.3	Diferencias según frecuencia escogida.....	42
4.2.4	Máximo y mínimo rendimiento a velocidad máxima.....	44
4.2.5	Estudio de viabilidad económica a una tasa binaria neta requerida. ....	46
4.3	Distribución de la señal en el interior del vagón .....	50
4.4	Conclusiones.....	52
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	53
5.1	Introducción.....	53
5.2	Conclusiones.....	53
5.3	Trabajo futuro .....	54
	Referencias .....	57
	Glosario .....	57

Anexo I: Frecuencia Doppler en función de la banda y velocidad.....	I
Anexo II: Antenas de emisión y recepción en banda de 2.6GHz .....	I

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-I: EVOLUCIÓN DE DATOS MÓVILES CONSUMIDOS A NIVEL MUNDIAL [2] .....	1
FIGURA 1-II: CONEXIONES GLOBALES POR TECNOLOGÍA [2].....	2
FIGURA 2-I: FOTO DE MARTIN COOPER.....	7
FIGURA 2-II: EJEMPLO FUNCIONAMIENTO OFDMA.....	10
FIGURA 2-III: CONSTELACIÓN QPSK .....	11
FIGURA 2-IV: CONSTELACIÓN 16QAM.....	12
FIGURA 2-V: CONSTELACIÓN 64QAM .....	12
FIGURA 2-VI: IMAGEN DEL AVE 103 .....	16
FIGURA 3-I: ESQUEMA BÁSICO DE ESCENARIO LTE .....	19
FIGURA 3-II: ESCENARIO DE INTERFERENCIAS .....	25
FIGURA 3-III: LEAKAGE .....	26
FIGURA 3-IV: CÁLCULO $\Delta\theta_{Horizontal}$ .....	28
FIGURA 3-V: CÁLCULO $\Delta\theta_{Vertical}$ .....	28
FIGURA 3-VI: CÁLCULO HIPOTENUSA PLANO VERTICAL.....	30
FIGURA 3-VII: CÁLCULO DE $\Delta\theta(r)$ .....	30
FIGURA 3-VIII: MCS CON TASA BINARIA .....	34
FIGURA 4-I: SINR .....	38
FIGURA 4-II: TASA BINARIA NETA .....	38
FIGURA 4-III: TASA BINARIA NETA TRAS CONFIGURACIÓN .....	39
FIGURA 4-IV: TASA BINARIA NETA REAL .....	40
FIGURA 4-V: SINR PARA TRES VELOCIDADES .....	41
FIGURA 4-VI: COMPARATIVA TASA BINARIA A DISTINTAS VELOCIDADES. ....	41
FIGURA 4-VII: ZOOM FIGURA XVI .....	42

FIGURA 4-VIII: SINR PARA DISTINTAS BANDAS DE FRECUENCIA .....	43
FIGURA 4-IX: TASA BINARIA ÚTIL PARA DISTINTAS BANDAS.....	44
FIGURA 4-X: TASA BINARIA ÚTIL MÁXIMA A 500 KM/H.....	45
FIGURA 4-XI: TASA BINARIA ÚTIL MÍNIMA A 500KM/H .....	45
4-XII: ESQUEMA SISTEMA LTE+WIFI .....	50

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2-I: CONFIGURACIONES TDD.....	10
TABLA 2-II: MCS PARA LTE [7] .....	14
TABLA 2-III: CARACTERÍSTICAS LTE .....	15
TABLA 3-I: ALTURAS Y DISTANCIAS DEL TREN Y LA ESTACIÓN BASE .....	20
TABLA 3-II: FÓRMULAS Y VALORES TÍPICOS RELATIVOS AL MODELO DE PROPAGACIÓN. ....	23
TABLA 4-I: RADIO DEL SECTOR VS TASA BINARIA NETA Y ÚTIL (800 MHz) .....	47
TABLA 4-II: RADIO DEL SECTOR VS TASA BINARIA NETA Y ÚTIL (2600 MHz).....	48
TABLA 4-III: SOLUCIÓN MADRID – CIUDAD REAL .....	49
TABLA 4-IV: SOLUCIÓN MADRID – VALLADOLID .....	49
TABLA 4-V: ESTANDARES DE WIFI.....	51





# 1 Introducción

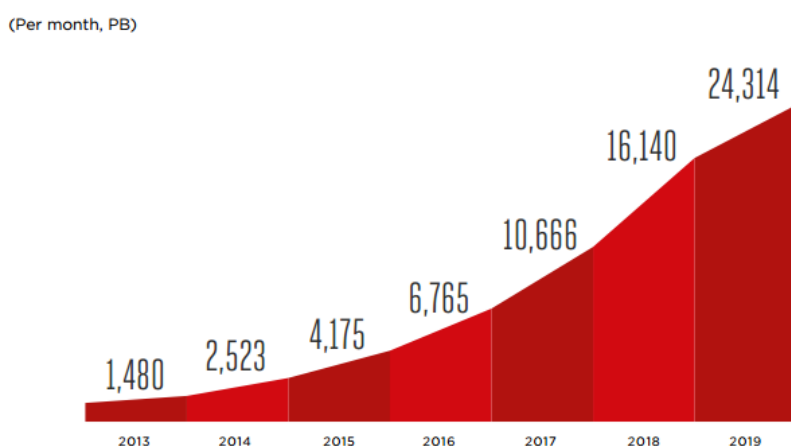
---

## 1.1 Motivación

El ser humano, desde sus inicios, ha tenido y tiene la necesidad de comunicarse. A lo largo de la historia ha ido buscándose los medios y las formas para hacerlo con el fin de hacer la tarea de sobrevivir algo más fácil gracias a la información que se comparte y que permite mejorar en ciertos aspectos de la vida cotidiana. Al principio se comunicaba por signos. Posteriormente evolucionó y comenzó a intercambiar palabras. Pasando por la escritura, por el telegrama, por ondas electromagnéticas que permiten las comunicaciones por satélite y hasta la telefonía móvil. Es esta última, la telefonía celular, junto con otras tecnologías como WiFi, la que ha hecho que a la era actual se les consideren como la era de la información. La telefonía celular ha evolucionado muy rápidamente, lo que ha permitido saltar de la elemental tarea de comunicación por voz a la descarga y subida de datos con Internet.

Hoy en día, gracias a servicios como Internet y a las telecomunicaciones que éste engloba, la sociedad tiene la necesidad y utilidad de disponer de información en cualquier momento en su dispositivo móvil teniendo una infraestructura y red de datos móviles. Esto hace que cualquier persona en cualquier momento pueda requerir y recibir información en su dispositivo. Incluso, en ocasiones, el disponer de esa información en ese momento puede ser un proceso crítico para esa persona.

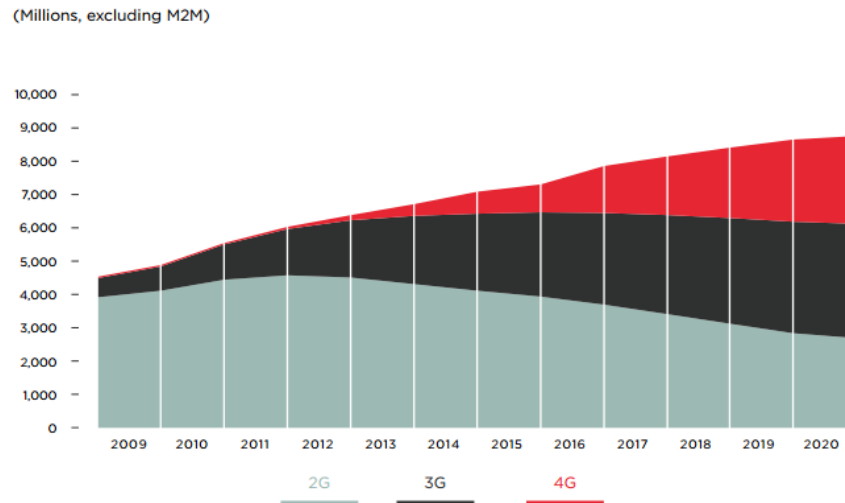
La comentada necesidad por la información ha tenido un crecimiento lineal en los últimos años y ha propiciado que sea fundamental desarrollar diversos estándares de comunicación para datos móviles en muy poco tiempo. Para que se pueda ver la dimensión del crecimiento y la tendencia de manera más clara, a continuación se muestra el crecimiento desde el año 2013 y las previsiones de consumo de datos a nivel mundial:



**FIGURA 1-I: Evolución de datos móviles consumidos a nivel mundial [2]**

Debido al aumento de demanda tanto en número de líneas como en ancho de banda, se han tenido en Europa, desde 1992[1] hasta hoy, 6 estándares de comunicaciones móviles, GSM (2G), GPRS(2,5G), Edge(2,75G), UMTS(3G), HSDPA(3,5G) y LTE(4G). Cada generación mejora en capacidad a la anterior y está pensada para soportar un mayor

número de usuarios. Dentro de todos esos estándares, el más reciente es LTE, una tecnología cada vez más asentada y con una fiabilidad más que probada que puede dar una tasa pico de 300 Mbps. Junto a que los gobiernos cada vez invierten más en la mejora de infraestructura 4G para mejorar la disponibilidad hace que la tendencia sea y vaya a ser la siguiente:



**FIGURA 1-II: Conexiones globales por tecnología [2]**

Por otro lado, las infraestructuras de transporte son cada vez más importantes dentro de las comunicaciones de un país. Una buena infraestructura de comunicaciones en transporte permite un desarrollo más rápido y ágil en términos económicos que si se tienen unas infraestructuras lentas y obsoletas. El tener una buena red de carreteras y de trenes, al igual que de disponer de vuelos continuos entre puntos estratégicos, permite tener conectados puntos distantes del mundo. Esto en un mundo cada vez más globalizado hace que sea fundamental estar cada vez más conectado.

Hoy en día, cada vez es más habitual en el mundo de la empresa la necesidad de disponer de cierto trabajador en un punto y al día siguiente en otro. Este hecho hace que, junto a los desplazamientos habituales por ocio y demás razones, sea necesario de disponer de varias alternativas de viaje para cubrir toda la demanda. Centrándonos en España y concretamente en los desplazamientos nacionales, el uso del tren de larga distancia ha crecido debido a la rapidez y comodidad en los viajes ya que puede llegar a alcanzar los 330 km/h [3]. Concretamente, el primer trimestre de 2014, el AVE ya superó en número de viajeros en desplazamientos nacionales de larga distancia con 1,9 millones frente a los 1,8 millones del avión según el Instituto Nacional de Estadística.

Entonces, vista la importancia de ambas infraestructuras para el crecimiento económico y bienestar social y las tendencias de uso del LTE y los trenes de alta velocidad, se antoja fundamental y necesario un estudio sobre la posible viabilidad de este estándar de comunicaciones en dichas circunstancias. Es decir, conseguir ver el rendimiento que se podría obtener, comprobar si de verdad se mejorarían las comunicaciones que hay en la actualidad dentro de los trenes en los viajes y si es así, que coste incuriría incorporar dicha tecnología. Para ello, se tiene que realizar un estudio exhausto de las características del LTE y adaptarlo a las características singulares de trenes que viajan a velocidades entre 250 y 500 km/h para posteriormente, realizar simulaciones y tener un estudio completo de



dichos sistemas. Esta es, en términos generales, la motivación de este Trabajo Fin de Máster.

## **1.2 Objetivos del Trabajo Fin de Máster**

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el estudio de la viabilidad y comportamiento, además de la simulación de rendimiento, de la red 4G en dispositivos que viajan en trenes de alta velocidad. Esto significa adaptar el problema del LTE a velocidades comprendidas entre los 250 y 500 km/h y a las características físicas específicas de dichos trenes para la obtención de valores concretos relativos a dicho estándar en estas circunstancias.

Todo surge como continuación a la línea de investigación seguida por el grupo RFCAS de la Escuela Politécnica Superior, en la Universidad Autónoma de Madrid, referente al estudio de las comunicaciones móviles aplicadas a infraestructuras de transporte. Este proyecto en concreto tiene como fin hacer visible y cuantificable el impacto de incorporar LTE a las redes de transporte de alta velocidad en términos de rendimiento y mejora respecto a los sistemas que existen en la actualidad.

Por lo tanto, la idea principal de este TFM consiste primeramente en adentrarse en el estudio del estándar LTE, además de conocer los detalles de los escenarios de trenes de alta velocidad, para posteriormente aplicar ese conocimiento. Aplicarlo mediante la creación de un software que permita simular con todo detalle dicho escenario para obtener resultados concretos de rendimiento y viabilidad de dicho sistema. Con los resultados ya obtenidos se podrán arrojar conclusiones sobre el posible uso de LTE bajo estas circunstancias y conocer así los límites de dicha tecnología.

Para ello, se buscará una simulación con el mayor detalle posible con el fin de ser lo más preciso que se pueda. Además, al tener LTE varias configuraciones se tendrán que simular con todas esas posibles configuraciones, lo que arrojará resultados distintos según éstas. Esto permitirá enriquecer el conocimiento sobre el tema y tener conclusiones más robustas.

En definitiva, los principales objetivos de este TFM son:

- Conocer en detalle el estándar LTE, esto implica tener en cuenta todas sus posibles configuraciones y parámetros posibles. Además de estudiar y aplicar todo el conjunto de factores atenuantes, interferencias y modelos de propagación a la señal que pueda repercutir en la tasa binaria útil que llega al tren.
- Conseguir simular un escenario que cuenta con el paso de un tren a una velocidad comprendida entre los 250 y 500 km/h además de la emisión de datos mediante el estándar LTE en el transcurso Downlink hacia el tren. Implementado mediante desarrollo software en la herramienta Matlab R2014a.
- Desarrollado el software de simulación, se tratará de extraer resultados en diversas circunstancias y diferentes situaciones según las características y parámetros del estándar LTE para un posterior estudio de viabilidad y calidad del sistema en términos de rendimiento. Esto implica tener resultados en el mejor y peor de los casos así como estudiar de qué manera afecta la frecuencia y la velocidad entre otros parámetros.

### 1.3 Fases de realización

Para el desarrollo de este proyecto ha sido necesario seguir una serie de fases con el fin de llegar a un resultado lo más óptimo posible:

- **Estudio y documentación:** En esta fase se fundamenta la base de este TFM ya que es de donde se obtiene la información para el posterior desarrollo. Para ello, hubo que estudiar en gran detalle el funcionamiento del estándar LTE para un sistema de telecomunicación, teniendo que recordar y ampliar conceptos estudiados a lo largo del grado y máster. Además, se tuvo que investigar y documentarse sobre el estado del arte en temas relacionados con LTE y sus aplicaciones en infraestructuras de transporte con trenes implicados.
- **Análisis y síntesis:** Después de una primera fase estudiando y viendo cómo se encontraba el tema de estudio, se pasó a seleccionar lo que verdaderamente se necesitaba para poder aplicarlo al programa de simulación. Es decir, elegir entre toda la información recogida los aspectos que se iban a estudiar y entrar en detalle.
- **Desarrollo:** Tras el análisis, y ya seleccionados los elementos teóricos a utilizar, se pasó al desarrollo del software de simulación en el programa Matlab R2014a. La salida que se buscaba era un programa que pudiese simular el escenario anteriormente comentado pero con la posibilidad de poder cambiar parámetros de simulación para poder extraer resultados en diferentes circunstancias.
- **Extracción de resultados:** Una vez desarrollado el software, se entra en la cuarta fase. Esta fase consiste en la extracción de resultados en función de los parámetros introducidos en el software implementado además de aumentar la funcionalidad de dicho programa con el fin de tener un estudio lo más completo posible. Además, se introduce un estudio de coste de aplicación según el rendimiento medio deseado y el estudio de la utilización de otra tecnología para el interior del tren.
- **Redacción de la memoria:** Para finalizar, se redactó el documento que se presenta para poder plasmar el conocimiento y la experiencia adquirida en este TFM.

### 1.4 Estructura del documento

En este apartado se muestra cómo va a estar estructurada la memoria de este Trabajo Fin de Máster:

1. En el siguiente capítulo se verán en detalle los aspectos teóricos fundamentales de LTE en los que se apoya este trabajo. Dentro de eso, se incluirá un pequeño resumen de cómo se ha llegado hasta LTE para comprender su evolución y aparición. También se incluirá un apartado de estado del arte que permitirá conocer cómo se encuentran las comunicaciones móviles en los trenes de alta velocidad y se comentaran estudios realizados por otros investigadores sobre el mismo tema. Esto permitirá encuadrar el contenido y la realización de este trabajo dentro de la temática estudiada.

2. Después de detallar la teoría, en el [capítulo 3](#) se explicará cómo se ha llevado a cabo la implementación del software básico de simulación de escenarios ferroviarios de alta velocidad. Esto implica presentar el escenario, sus parámetros y todo el conjunto de factores atenuantes de la señal para el futuro cálculo de la señal en recepción y su respectiva tasa binaria.
3. En el [capítulo cuarto](#), se pondrá en uso el Software elaborado para diversos casos y para comprender en que partes y de qué manera se degrada la señal. En definitiva, se hará un análisis amplio del rendimiento de LTE para distintas casuísticas con el fin de poder ver la verdadera utilidad y capacidad del estándar de cuarta generación.
4. Por último, en el [capítulo 5](#) se verán las conclusiones del trabajo realizado, así como posibles trabajos y líneas de investigación futuras que se pueden seguir para continuar con la temática del documento que se presenta.



## **2 Tecnología LTE y Trenes de Alta Velocidad**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo de la memoria, conocidos ya los objetivos y la motivación para hacer este proyecto, se trata de dar a conocer al lector la teoría y fundamentos en los que se basa la realización de este trabajo. Para ello, habrá tres partes bien diferenciadas. En la primera se expondrá de manera resumida los aspectos técnicos y características más importantes de funcionamiento del estándar LTE. De seguido, se verá y se expondrán las características más importantes de los trenes de alta velocidad y qué les diferencia de los trenes habituales. Por último, en el apartado de estado del arte, se verán conclusiones e investigaciones de otros trabajos relacionados con el tema a trabajar y también se verá qué se utiliza en la actualidad para comunicaciones en trenes.

Todo lo anterior permitirá al lector una comprensión con el suficiente detalle para ver qué aspectos se han incorporado en el desarrollo y cómo se ha creado.

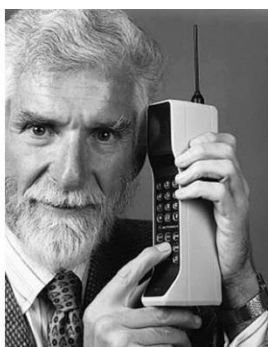
### **2.2 Estándar LTE**

En este apartado se pretende mostrar y enumerar las características más relevantes del estándar LTE que posteriormente se utilizarán en el desarrollo del software para la simulación. Aunque eso sí, se comenzará primeramente con una breve historia de cómo se ha llegado hasta el LTE y qué es LTE. Con esto se comprenderá por qué se le encuadra en la cuarta generación de las comunicaciones móviles.

#### **2.2.1 Historia breve de las comunicaciones móviles: Cómo se ha llegado al 4G**

Se puede decir que el inicio de las comunicaciones móviles se remonta a 1901 cuando Marconi consigue transmitir su voz a través del Mar Atlántico gracias a la primera comunicación inalámbrica conocida. A partir de ese preciso instante, podemos decir que la historia de la red móvil comenzó a escribirse.

Pero sin embargo no es hasta 1973 cuando se realiza la primera llamada telefónica a través de un dispositivo móvil. Concretamente, la realizó Martin Cooper, directivo de la empresa Motorola, desde el hotel Hilton de la Sexta Avenida de Nueva York. Más tarde, en 1975, la FCC (Federal Communication Committee) concede a AT&T la primera licencia para lanzar un servicio de red móvil en la ciudad de Chicago. Este servicio se llamó AMPS (Advanced Mobile Phone Service).



**FIGURA 2-I: Foto de Martin Cooper.**

Es a partir de estos acontecimientos cuando en los años 80, con ya instaladas varias redes de móviles, nace la primera generación de comunicaciones móviles, también conocida como 1G. Los sistemas de comunicaciones móviles de primera generación o 1G representan al conjunto de estándares que emplean tecnologías analógicas, por lo que comúnmente se habla por igual de sistemas analógicos o 1G. La principal característica de estos sistemas era su capacidad para ofrecer servicios de comunicación de voz sobre conmutación de circuitos. Además de la voz, permitían la transmisión de datos, aunque con una capacidad muy limitada que rondaba los 4800 bps [4].

Fue ya en 1991 cuando llegó la segunda generación de redes de comunicaciones móviles. Dichas redes, llegaron de la mano del estándar mundial denominado *Global System for Mobile Communications*, más conocido como GSM. La red 2G GSM fue utilizada por primera vez, comercialmente hablando, en 1991 por el operador finlandés 'Radiolinja'. Su desarrollo fue debido de la necesidad de poder tener un mayor manejo de llamadas en prácticamente los mismos espectros de radiofrecuencia asignados a la telefonía móvil, para esto se pasó de telefonía analógica a digital. Esto permitió más enlaces simultáneos en un mismo ancho de banda, envío de mensajes de texto (SMS) y una mayor capacidad de envío de datos desde dispositivos de fax y módem.

Dentro de la segunda generación se encuentra como protocolo más importante el GSM (*Global System for Mobile Communications*). Dentro de los tipos de GSM, el P-GSM 900 y su extensión E-GSM 900 son los utilizados en Europa, mientras que R-GSM 900 se utiliza para los servicios ferroviarios. Todos funcionan en torno a los 900 MHz de frecuencia y tiene una tasa pico en enlace de bajada (*Downlink*) de unos 43,2 kbps.

A posteriori surgieron los estándares de GPRS (*General Packet Radio Service*) y EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) considerados como comunicaciones 2,5G y 2,75G respectivamente. GPRS, que está orientado a paquetes, dio a lugar a la aparición del servicio de mensajes multimedia (MMS) con tasas pico en Downlink de 171,2 kbps. Mientras que EDGE, consiguió el tiempo de latencia de GPRS, también con la técnica de conmutación de paquetes, hasta llegar a los 473,6 kbps.

En 2001, el 3G llegó inicialmente de la mano de la japonesa NTTDoCoMo bajo la marca FOMA. En el mes de octubre de 2001 llegó el primer lanzamiento comercial de 3G en Japón. 3G es la abreviación de tercera generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Con dicho estándar se consiguió aumentar la capacidad multimedia respecto a los estándares de segunda generación además de aumentar la velocidad de acceso a Internet. Esto permite transmitir audio y video en tiempo real y una transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas. Se consiguen tasas de hasta 7,2 Mbps teóricos en las mejores condiciones con este estándar.

Posteriormente, como paso final antes de la cuarta generación se introdujo el estándar HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), coloquialmente clasificado como 3,5G. Debido a una optimización de la velocidad del enlace de bajada respecto a UMTS se consigue una tasa de hasta 14,4 Mbps con la modulación 16QAM.

Finalmente, tras empezar todo en la primera transmisión por voz realizada por Marconi en 1901 y tras pasar por todos los estándares de las comunicaciones móviles que han ido surgiendo a lo largo de la historia, se llega al LTE, que entra en España en verano de 2013.

### 2.2.1 LTE: Long Term Evolution

LTE es la abreviatura de *Long Term Evolution* y está registrada y pertenece a la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Es un estándar de comunicaciones móviles, clasificado en la cuarta generación, para transmisión de datos y que fue desarrollado con GSM/UMTS de base. Fue introducido en el año 2004 por la empresa japonesa NTT DoCoMo y es en 2005 cuando se comienza a estudiar su viabilidad como nuevo estándar. Sin embargo, no es hasta 2013 cuando se incorpora el LTE a España. Dicho estándar surge con el fin de incrementar la capacidad y la velocidad de las redes móviles utilizando nuevas técnicas de modulación.

Con LTE se consiguen las siguientes mejoras respecto a estándares anteriores [5]:

- Pico de tasa: Tasa instantánea en el enlace de bajada de hasta 100 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz.
- Número de usuarios: Se pueden soportar al menos 200 usuarios por sector para anchos de banda superiores a los 5MHz.
- Latencia: Se tiene una latencia de unos 10ms en el plano de usuario.
- Rendimiento en el usuario: La media de rendimiento por MHz es de 3 a 4 veces superior que en HSDPA en Downlink.
- Eficiencia en el espectro: En una red cargada, la eficiencia del espectro es de 3 a 4 veces superior que en HSDPA en enlace de bajada.
- Flexibilidad en el espectro: Se tienen diferentes anchos de banda, incluidos 1,4MHz, 3MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz.

En la mayoría de mejoras, solo se muestran los datos en el enlace de bajada o Downlink debido a que va a ser el enlace de estudio para este TFM.

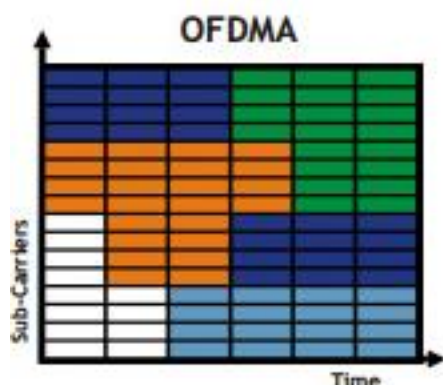
Vistas las mejoras y picos de rendimiento que puede tener el LTE, a continuación se van a desglosar los aspectos y parámetros técnicos que hacen posibles estos datos.

#### 2.2.1.1 Multiplexación en LTE: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

Entendemos como multiplexación en telecomunicaciones la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión usando un dispositivo llamado multiplexor. Existen muchas estrategias de multiplexión según el protocolo de comunicación empleado, que puede combinarlas para alcanzar el uso más eficiente. Entre estas estrategias se encuentra la multiplexación en tiempo (TDMA), en frecuencia (FDMA), por división de código (CDMA) y mediante acceso múltiple con división ortogonal en frecuencia (OFDMA).

OFDMA es la multiplexación utilizada en el enlace de bajada para LTE. Este método de acceso permite asignar un número diferente de subportadoras a cada uno de los usuarios garantizando así, una diferente calidad de servicio (QoS) en función del ancho de banda asignado. Es decir, permite establecer una velocidad de conexión y una probabilidad de error individualmente para cada usuario, esto hace que los usuarios pueden alcanzar

diferentes velocidades de conexión en diferentes momentos de tiempo gracias a un factor que se le asigna a cada usuario. A continuación, se muestra una figura muy simplificada de un ejemplo de lo que puede hacer OFDMA en función del tiempo y la frecuencia:



**FIGURA 2-II: Ejemplo funcionamiento OFDMA**

Cada color corresponde a la transmisión de datos que existe con un usuario. Como se puede ver, para un determinado instante de tiempo puede haber compartición del ancho de banda por parte de varios usuarios. Esta partición se realiza en función de la información recibida del canal, siendo un aspecto adaptativo a la situación en la que se encuentra el canal y los usuarios.

#### **2.2.1.1 Duplexación en LTE: FDD y TDD.**

Un sistema que permite duplexación es un sistema que es capaz de mantener una comunicación bidireccional, enviando y recibiendo mensajes de forma simultánea. En el caso del estándar LTE permite la duplexación en tiempo y en frecuencia.

- **TDD (*Time-Division Duplexing*):** Consiste en separar la comunicación Downlink de la Uplink mediante la separación de ambos flujos en el tiempo. Este método es muy ventajoso en escenarios donde se requiera asimetría entre ambos flujos, es decir, donde se requiera más tiempo de flujo Downlink que Uplink o viceversa. Como por ejemplo en aplicaciones que permitan descargas de contenidos de gran tamaño.

En el caso de LTE, cuando se usa TDD existen diferentes configuraciones de los flujos en función de las circunstancias dadas. A continuación se muestra la tabla dada por IEEE con dichas configuraciones donde D es el flujo Downlink, U es el Uplink y S son los puntos de cambio entre flujos:

Uplink-Downlink Configuration	Subframe Number									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

**TABLA 2-I: Configuraciones TDD**



- **FDD (*Frequency-Division Duplexing*):** La duplexación por división de frecuencia consiste en que el transmisor y el receptor operan a diferentes frecuencias portadoras y por lo tanto, el tráfico uplink y downlink están separados en frecuencia. Este escenario puede ser eficiente en el caso de tráfico simétrico ya que la duplexación por división de tiempo tiende a desperdiciar ancho de banda durante el cambio de transmisión a recepción. Sin embargo, debido al carácter cambiante de la mayoría de conexiones en LTE, este tipo se antoja poco eficiente en la mayoría de aplicaciones.

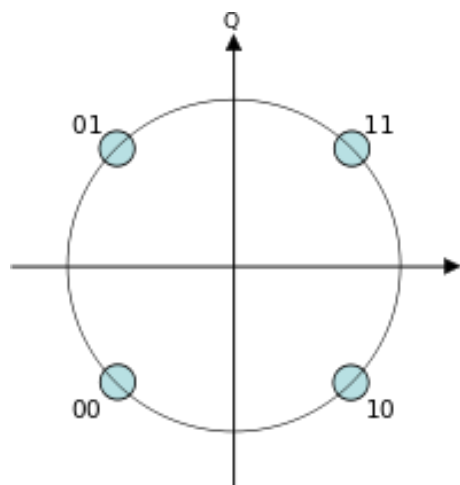
#### **2.2.1.2 Modulaciones Downlink en LTE: QPSK, 16QAM y 64QAM.**

La modulación engloba el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora. Según la *American National Standard for Telecommunications*, la modulación es el proceso, o el resultado del proceso, de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. El propósito de la modulación es sobreponer señales en las ondas portadoras con el fin de poder transmitir símbolos.

En el caso de LTE, se tienen tres tipos distintos de modulación que se escoge según las circunstancias en las que se encuentra la transmisión de datos.

- **QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*):** Modulación que se encuadra dentro de las modulaciones de desplazamiento en fase (PSK). Este tipo de modulaciones se caracterizan por hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. La fase de la señal portadora representa cada símbolo de información de la señal moduladora, con un valor angular que el modulador elige entre un conjunto discreto de ciertos valores posibles. Dependiendo del número de posibles fases a tomar, recibe diferentes denominaciones. Dado que lo más común es codificar un número entero de bits por cada símbolo, el número de fases a tomar es una potencia de dos.

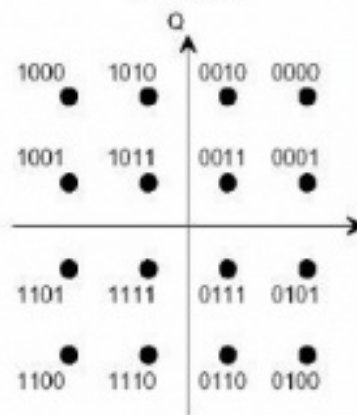
En el caso del QPSK dispone de 4 fases y esto hace que sea posible mandar dos bits por símbolo. A continuación se muestra el diagrama de constelación de la modulación QPSK:



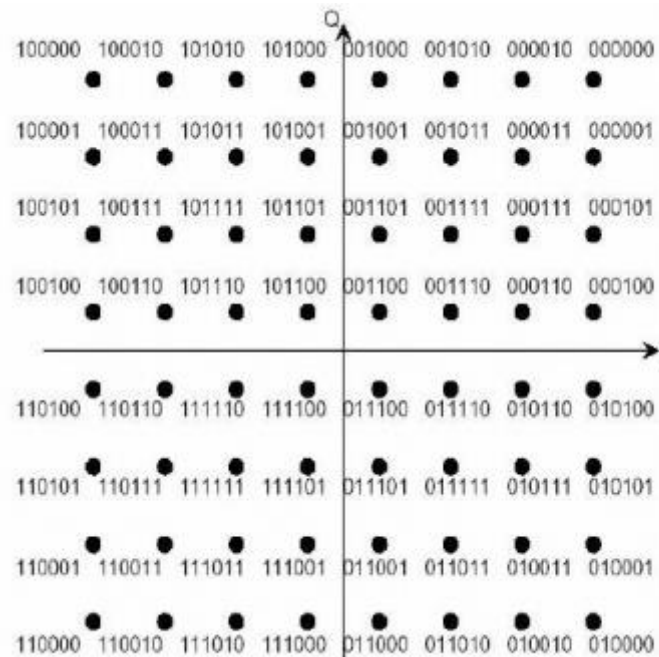
**FIGURA 2-III: Constelación QPSK**

- 16QAM y 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): Ambas modulaciones pertenecen al grupo de modulaciones de amplitud en cuadratura. La modulación QAM permite que dos señales provenientes de dos fuentes independientes, pero con características de ancho de banda similares, ocupen el mismo ancho de banda de transmisión y se puedan separar en el extremo receptor, ahorrando así el uso del ancho de banda disponible. Para llegar a esto se modula la señal portadora, tanto en amplitud como en fase.

Esta variación en amplitud y fase da a lugar a N-QAM, donde cada grupo de m-bits genera  $2^m = N$  estados de modulación. Por lo tanto, siguiendo esto, tenemos que 16QAM es capaz de tener 4 bits por símbolo, mientras que 64QAM puede generar hasta 6 bits por símbolo. A continuación se muestran las constelaciones de 16QAM y de 64 QAM:



**FIGURA 2-IV: Constelación 16QAM**



**FIGURA 2-V: Constelación 64QAM**

### **2.2.1.3 Codificación en LTE: Turbo códigos.**

El uso de todas las características comentadas anteriormente de manera errónea o equivocada (modulación, multiplexación y duplexación) más el ruido que pueda afectar en la transmisión y recepción de los datos puede hacer que la información que llegue esté en mal estado. Para ello, se hace inevitable una codificación y decodificación del canal para evitar todo este tipo de errores en emisión y recepción respectivamente. Esto se consigue mediante redundancia de información, repeticiones y un conjunto de técnicas que en definitiva hacen que se baje la tasa de bits útiles a cambio de asegurar que llegue correctamente. Estas técnicas permiten en recepción detectar y corregir errores para poder hacer una reconstrucción de los datos recibidos.

En el caso de LTE, como técnica de corrección de errores, se usan los turbo códigos:

- Turbo códigos: En el campo de las telecomunicaciones y teoría de la información, la función de corrección de errores en el receptor (FEC, *Forward Error Correction*), también llamada codificación de canal, es un mecanismo de control de la transmisión de datos, donde el transmisor añade de forma automática información redundante en sus mensajes. El diseño adecuado de esta redundancia permite que el receptor pueda detectar y corregir un número determinado de errores ubicados en cualquier lugar del mensaje sin la necesidad de realizar peticiones de reenvío al transmisor.

En la actualidad destacan fundamentalmente dos tipos de codificación, las cuales se quedan muy cerca del límite teórico de Shannon para la capacidad del canal: Turbo Códigos y códigos LDPC. Tanto los Turbo Códigos como los LDPC proporcionan prestaciones similares, aunque analizando su complejidad y versatilidad, los LDPC son más apropiados para palabras de código de mayor longitud, mientras que los Turbo Códigos ganan enteros en sistemas con palabras de código más cortas. Además, los Turbo Códigos ofrecen mejor capacidad de adaptación a diferentes tasas de transmisión [6].

Por lo tanto, los turbo códigos se eligen para codificar los flujos LTE debido a su capacidad de adaptación a diferentes tasas de transmisión, ya que como se vio en el apartado de TDD, se necesita una adaptación en función de la calidad del enlace y del usuario siendo esta una característica que forma parte de la naturaleza de este estándar de cuarta generación.

### **2.2.1.4 Tabla MCS para LTE.**

Como ya se ha comentado anteriormente, LTE permite adaptar el uso de los enlaces con los usuarios con el fin de explotar al máximo posible y mejorar la eficiencia espectral en cada momento. Para poder llevar a cabo esto, es necesario obtener información de la calidad de cada uno de los enlaces y poder asignar así una modulación y emplear una codificación más o menos robusta.

Habiendo visto los conceptos técnicos de codificación y modulación, se puede introducir la tabla MCS (*Modulation Coding Scheme*). Se va a mostrar dicha tabla para que se pueda seguir mejor la explicación de su funcionamiento:

MCS	Modulation	Bits per symbol	Coding Rate	SINR (dB)
0	-	-	-	<-3.4
1	QPSK	2	0.17	-3.4
2	QPSK	2	0.23	-2.3
3	QPSK	2	0.29	-1.4
4	QPSK	2	0.36	-0.4
5	QPSK	2	0.45	0.8
6	QPSK	2	0.55	2.7
7	QPSK	2	0.64	5.3
8	16QAM	4	0.5	6.8
9	16QAM	4	0.55	7.5
10	16QAM	4	0.62	8.5
11	16QAM	4	0.72	10
12	16QAM	4	0.8	11.4
13	64QAM	6	0.64	14
14	64QAM	6	0.68	14.5
15	64QAM	6	0.76	15.8
16	64QAM	6	0.82	17.1
17	64QAM	6	0.91	19.8

**TABLA 2-II: MCS para LTE [7]**

Siguiendo esta tabla, es el dispositivo del usuario el que indica mediante el código MCS la calidad del enlace. Para ello, simplemente mide el SINR en recepción y lo asocia con el código correspondiente. Es entonces, con esa información, cuando el nodo emisor, según la información obtenida del usuario, codifica y modula según el MCS recibido.

Como se puede ver, cuanto más bajo es el MCS la modulación es más conservadora y la codificación es más robusta para evitar errores. En caso contrario, a medida que subimos en MCS significa que el SINR es mayor y por lo tanto no hace falta una codificación tan severa y permite un mayor envío de símbolos. Al igual ocurre con la modulación, cuanto mayor es la calidad, se permite un número mayor de bits por símbolo.

Esta tabla será fundamental para el desarrollo del software de simulación y para el estudio posterior de los resultados.

#### ***2.2.1.5 Resumen características LTE***

Finalmente, tras ver los aspectos técnicos más importantes referentes a LTE se considera importante añadir esta subsección con el fin de disponer de todos los datos en un apartado, ya que estos serán la base para el desarrollo y los resultados. Con esto se quiere que el lector tenga un apartado de referencia para consultarlos.

Características fundamentales LTE	
Tecnología de Radio	OFDMA, TDD y FDD
Bandas de uso(MHz)	800 - 1800 -2600
Modulaciones soportadas	QPSK, 16QAM, 64QAM
Ancho de banda (MHz)	1.4 - 3-5-10-15-20
Latencia	10 ms
Tasa de pico teórica	100Mbps (20 Mbps)
Codificación	Turbo códigos
Separación subportadoras	15 KHz
Prefijo cíclico	4,7 $\mu$ s (corto), 16.7 $\mu$ s (largo)

**TABLA 2-III: Características LTE**

## 2.3 Trenes de alta velocidad

Esta sección tiene como fin aclarar qué se considera un tren de alta velocidad y sus características fundamentales, además de ver ejemplos tanto nacionales como internacionales.

Se denomina tren de alta velocidad, tren rápido o tren bala a aquel que alcanza velocidades superiores a 200 km/h sobre líneas existentes actualizadas, y 250 km/h sobre líneas específicamente diseñadas para tal fin según la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC, *Union Internationale des Chemins de Fer*). Su elevada velocidad les permite competir con el transporte aéreo para distancias medias y además está considerado como el medio de transporte más seguro del mundo, superando incluso al avión. En los últimos 40 años solo ha habido cinco accidentes con víctimas mortales.

En el párrafo anterior se ha comentado cual era la velocidad mínima que debe alcanzar un tren de alta velocidad, sin embargo, en cuanto al límite superior en velocidad, no existe como tal para trenes de alta velocidad. Por lo tanto, se hace necesario investigar sobre las velocidades máximas alcanzables en la actualidad y poder así realizar un estudio de viabilidad completo:

En Europa, el tren más rápido es el AGV Italo (Italia) con velocidad máxima operativa alcanzable de 360 km/h. Pero, en fase de pruebas, logró batir el record en 2007 de 574,8 km/h. Mientras que a nivel nacional, El Siemens Velaro E, comúnmente conocido como AVE 103, es el tren más rápido con una velocidad máxima operativa de 350 km/h y con una velocidad máxima en pruebas de 403,7 km/h [8]. Sin embargo, es en China donde se encuentran los trenes más rápidos del mundo en velocidad operativa. Estos son el Shanghai Maglev y el China Railways CRH380A con velocidades operativas de 430 y 380 km/h respectivamente [9].

Según estos datos, se ha decidido que las velocidades de estudio para trenes de alta velocidad vayan desde los 250 km/h como límite inferior y los 500 km/h como límite superior. Se elige ese límite superior ya que, aunque hay modelos de trenes como el AGV Italo que han superado esa velocidad en pruebas, ninguno de ellos supera esa velocidad como velocidad operativa máxima.



**FIGURA 2-VI: Imagen del AVE 103**

## **2.4 Estado del arte**

En este apartado se pretende dar a conocer la situación actual en cuanto a comunicaciones se refiere en el mundo de las infraestructuras ferroviarias. De seguido, se añadirán resultados y conclusiones de estudios realizados por otras universidades e investigadores relacionados con la temática de este trabajo. Esta información permitirá al lector situar de mejor manera el TFM que se expone en cuanto a lo que hay implementado en la actualidad y los estudios realizados.

### **2.4.1 Estado de las comunicaciones en los trenes**

En la actualidad existen dos métodos de comunicación vigentes en los trenes en España, el sistema Tren-Tierra y el sistema GSM-R:

- **Tren-Tierra:** Sistema de radiotelefonía analógico que nace a causa de que las comunicaciones entre el puesto de mando y el tren no eran posibles debido a la orografía. El tener que pasar por valles y túneles hacía que hubiera diversos puntos sin cobertura a lo largo del país y esto hizo que RENFE creara un sistema específico para que funcionara en sus líneas. Es en 1983 cuando es desarrollado por la empresa Alcatel como continuación al trabajo de AEG.

Sin embargo, este sistema con el paso de los años se queda corto en términos de comunicación y se comienza a implantar el sistema GSM-R. De hecho, las líneas de nueva construcción y las de alta velocidad han abandonado el uso del sistema analógico tren-tierra en favor del sistema GSM-R, más moderno y de señal digital.

- **GSM-R (*Global System for Mobile Communications for Railways*):** Es un sistema de comunicaciones para la explotación ferroviaria basado en el Estándar GSM de radio pública del Instituto Europeo de Comunicaciones (ETSI). Dispone de una banda de frecuencias para *Uplink* entre 876 MHz y 880 MHz y 921 MHz a 925 MHz en *Downlink*, es decir, basado en FDD.

En cuanto a infraestructura, para poderse comunicar con los trenes, el sistema ha necesitado disponer de varias antenas situadas a lo largo de la vía de modo que la cobertura sea total, incluso en los túneles. Además, garantiza un correcto funcionamiento para trenes que circulan hasta 500 km/h.

Entre los usos de GSM-R destaca el uso como sistema de radiotelefonía y transmisión de mensajes de texto entre cabina y centro de control, el uso a modo de baliza móvil indicando al centro de control la posición del tren y el uso para

transmitir las autorizaciones de movimiento (indica la velocidad máxima para un determinado momento).

Este sistema ha sido el elegido como estándar en las comunicaciones en trenes y ferrocarriles y actualmente está en fase de operación, implantación o proyecto en todos los ferrocarriles europeos, Norteamérica, China, India, algunos países africanos, Australia y Brasil. En España, está implantado en todas las líneas de alta velocidad y además en núcleos de cercanías como Bilbao, Santander y Madrid.

Vistos ambos sistemas, se puede concluir que ambos sistemas se quedan obsoletos ante la demanda de información y de cobertura de datos exigida por la sociedad en la actualidad. El sistema Tren-Tierra es un sistema que nació con el fin de comunicar de manera básica a la cabina con el centro de control y esa funcionalidad tan simple a día de hoy se queda anticuada y poco eficiente, por eso se ha ido sustituyendo por GSM-R. Sin embargo, GSM-R, con los avances que ha habido desde el GSM hasta el LTE actual, se antoja corto de nuevo. De hecho, no permite uso por parte del usuario debido a su corta capacidad y esto es algo, que sin duda, se puede mejorar con la tecnología LTE.

#### **2.4.2 Estudios relacionados**

El hecho de que desde GSM-R no haya existido ningún estándar de comunicaciones móviles para trenes no ha pasado desapercibido para la comunidad universitaria e investigadora. Debido a la fiabilidad y características de LTE ha habido diversos estudios sobre la posible aplicación de este estándar a la infraestructura ferroviaria y en concreto a la de alta velocidad. Es en este tipo de trenes, los de alta de velocidad, donde se han centrado más esfuerzos de estudio debido a que es donde podría haber más problemas de implantación ya que la velocidad afecta de manera considerable a la calidad de la señal en recepción.

Concretamente ha habido estudios como [10] que han tratado el tema de la factibilidad y los retos que se tendrían que afrontar en caso de instaurar LTE en la infraestructura de trenes de alta velocidad. Se comentan a alto nivel los requisitos que se deberían cumplir, las aplicaciones que debería y que podría soportar y se menciona que se podría conseguir mejor rendimiento pero sin dar datos numéricos concretos. También ha habido investigaciones como [11] que han estudiado las propiedades del canal de comunicaciones en trenes de alta velocidad en situaciones como viaductos, zonas llanas y zonas por debajo del nivel de tierra tanto en zonas rurales como urbanas arrojando fórmulas para estas condiciones estudiadas a nivel de enlace. Por otro lado, en el estudio [12], se basa en una simulación de un transcurso real en vías de Dinamarca donde se obtienen tiempos de retardos y porcentajes de error en paquetes para LTE y ver así su posible viabilidad en cuanto a tasas de error y pérdidas. Por último, también ha habido estudios centrados en aspectos más específicos del LTE en trenes de alta velocidad, como es el *Handover*. En [13] se propone la forma en que se debe coordinar el cambio de estación base con el fin de hacer el traspaso (*Handover*) más óptimo durante el transcurso del tren.

Sin embargo, ninguna de las investigaciones anteriormente comentadas realiza un estudio completo de viabilidad de la implantación de LTE en trenes de alta velocidad, entendiendo por completo, un estudio que obtenga y cuantifique la calidad de la señal recibida en el tren teniendo en cuenta todo el conjunto de pérdidas y factores atenuantes implicados en el sistema. Obtenida la calidad de la señal en el tren a lo largo de un recorrido se podría

decidir si es viable y conocer así la mejora respecto a lo existente. Por lo tanto, lo que se busca con este trabajo, es hacer tangible y cuantificable lo que sería el LTE en un sistema de trenes de alta velocidad con la mayor precisión posible y con resultados numéricos para poder así extraer conclusiones fundamentadas en dichos resultados y en este estudio. Con las conclusiones y los resultados finales se pretende que sirvan de utilidad a diseñadores e investigadores para una futura implantación teniendo en cuenta que todos los resultados mostrados se basan en simulaciones.

## **2.5 Conclusiones**

En este capítulo se ha comenzado mostrando de manera resumida el paso de estándar en estándar a lo largo de la historia de las comunicaciones móviles hasta llegar a LTE permitiendo conocer así las mejoras que se han ido consiguiendo. De seguido, se han expuesto los aspectos técnicos del estándar de cuarta generación y haciendo especial hincapié en aquellos que afectan de alguna manera en el desarrollo de la simulación a implementar. Con esto se ha pretendido que el lector disponga de una referencia de conceptos básicos aplicados en este trabajo y no necesite buscar más información por su cuenta para poder seguir la explicación en próximos capítulos.

Además, se ha visto la definición de tren de alta velocidad y se han introducido los modelos más rápidos y potentes de la actualidad a nivel mundial con el fin de poder acotar los límites de velocidad a los que se enfrenta este trabajo. Por otro lado, se han visto los protocolos y estándares de comunicaciones más utilizados en trenes de manera resumida y sus limitaciones.

Finalmente, en el apartado final de estado del arte, se han introducido estudios relacionados con la temática que atañe este trabajo y que han ayudado a poner en situación el estado de la investigación sobre este tema y que se han utilizado como referencia en el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster.



## 3 Calculo de SINR y la Tasa Binaria

---

### 3.1 Introducción

Tras haber visto y asentado la base de teórica en la que se fundamenta este trabajo se pasa al siguiente paso. En este capítulo se pretende diseccionar y explicar cómo se ha desarrollado el software de simulación del sistema LTE adaptado a escenarios de trenes de alta velocidad. Para ello se comentará paso a paso el código implementado y se introducirán y comentarán las fórmulas matemáticas sobre las que se obtienen resultados numéricos referentes al rendimiento del estándar de cuarta generación. Además se esquematizará el escenario de estudio que envuelve al tren y a la estación base transmisora.

Con el fin de que sea más fácil de estructurar este capítulo, se dividirá en las siguientes secciones:

- Escenario de estudio y parámetros iniciales.
- Modelo de propagación, interferencias y factores atenuantes.
- Medidas de calidad de la señal: SNR y SINR.
- Cálculo de SNR, SINR y tasa binaria en recepción.

En los tres primeros apartados se explicarán en detalle los factores que afectan de una manera u otra al problema. Esto incluye saber qué son y cuando se aplican además de saber cómo se calculan. Mientras que el último apartado mostrará en qué orden y de qué manera se han aplicado dichos factores para llegar hasta la solución final.

### 3.2 Escenario de estudio y parámetros iniciales

#### 3.2.1 Escenario básico y distancias del problema

Para poder saber hasta dónde abarca este trabajo se necesita saber el escenario sobre el que se van a realizar las investigaciones y el cálculo. En este caso, se busca simplificar el máximo posible el escenario, evitando poner desniveles en la trayectoria del tren o cambios de trayectoria, ya que no es lo que se busca implementar en este trabajo. En su lugar, se quiere simular un escenario básico de paso de un tren en línea recta.

Para ello, se cuenta con una antena emisora o estación base situada en el punto 0 de referencia respecto al plano X y se simulará el paso del tren a una velocidad comprendida entre los 250 y 500 km/h. El esquema es el siguiente:

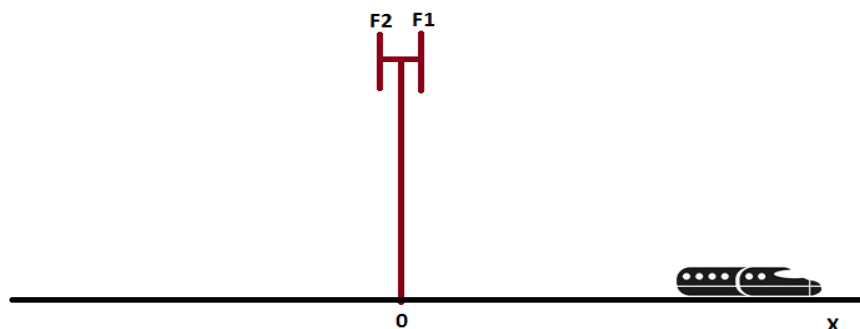


FIGURA 3-I: Esquema básico de escenario LTE

La simulación del movimiento del tren se realizará desde el punto 0 hasta el borde de la cobertura de la antena o también denominado radio de cobertura R.

Por otro lado, F1 y F2 indican las frecuencias a las que emiten cada una de las antenas. F1 es en este caso la frecuencia deseada y emite hacia el tren que se sitúa entre el punto 0 (donde se encuentra la antena) y el punto R, es decir, para los trenes que se encuentren a la derecha de la antena dentro del radio de cobertura. Mientras que F2 sería la frecuencia no deseada y que emite en la otra dirección. Es decir, se encarga de dar cobertura al tren desde el punto  $-R$  hasta el 0. Este concepto se verá más en detalle cuando se traten las interferencias y señales deseadas.

Con el escenario básico dispuesto, es necesario detallar distancias y alturas que se encuentran fijas a lo largo de este problema. Estas distancias y alturas se han elegido cuidadosamente e intentando que fuesen lo más reales posibles para poder tener un análisis lo más parecido a la realidad posible. Estos datos son:

Alturas y distancias fijas	
Altura de la estación base	8 metros
Altura del tren	4,1 metros
Distancia de la estación base a la vía	5 metros

**TABLA 3-I: Alturas y distancias del tren y la estación base**

La altura de la estación base es necesaria para conocer la distancia que recorre la señal hasta llegar al tren, al igual que la altura del propio tren. Un aspecto que no se ha comentado hasta ahora es donde se va a realizar la recepción de la señal LTE del tren. Pues bien, el sitio elegido es el techo del propio tren, de ahí que sea importante conocer la altura de éste. Se ha elegido este punto debido a que es el punto más alto del tren y esto hace que la señal recorra menos distancia que si tuviese que penetrar el metal. Además, al estar en el exterior, se evitan pérdidas por el metal y hace que se obtenga un sistema más óptimo.

### 3.2.2 Parámetros del problema

Vistas las distancias y el escenario básico a estudio, se pasan a ver los parámetros utilizados en el sistema. Dichos parámetros se pueden clasificar en parámetros del LTE, parámetros de las antenas de emisión y recepción, parámetros del tren y parámetros del enlace.

- Parámetros LTE:
  1. Bandas de frecuencia LTE: Como se ha visto en el capítulo anterior, las bandas de frecuencia para LTE son 800 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz.
  2. Ancho de banda nominal LTE: Configurable entre 1,4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz.
  3. Radio del sector en emisión: distancia máxima a la que emitirá la antena en transmisión.

- Antena de emisión y recepción:
  4. Potencia de transmisión: Es la potencia con la que emite la antena en emisión. En este problema, la mayoría de simulaciones se hará con  $P_{tx} = 2W$  que es equivalente a  $P_{tx\_dBm} = 33,01$  dBm.
  5. Ganancia de transmisión: Ganancia que ejerce la antena al emitir. En este problema se utilizará  $G_{tx\_dB} = 12$  dB.
  6. Ganancia de recepción: Se utilizará  $G_{rx\_dB} = 0$  dB.
  7. *Side Lobe Level*: Es la potencia que emite la antena fuera del lóbulo principal. Se utilizará para el cálculo de interferencias más adelante. El valor en este problema será de 20 dB.
  8. *Theta 3dB*: Es el ángulo que se forma cuando se produce una caída de 3dB respecto al máximo de apuntamiento de la antena. En este caso, el valor es de 30 grados.
  9. Factor de ruido: Es la degradación de la relación señal/ruido provocada por el dispositivo. En el problema tiene un valor de 7 dB.

El conjunto de valores relacionados con aspectos de emisión y recepción de las antenas han sido elegidos en función de valores reales de antenas utilizadas en la actualidad para el estándar LTE.

- Parámetros del tren:
  10. Velocidad del tren: Es el único aspecto variable del tren, sin contar las características físicas. La velocidad siempre tiene que ir comprendida entre 250 y 500 km/h al ser un tren de alta velocidad.

Conocidas las variables del problema, se puede ver que cada combinación de valores podría arrojar un resultado levemente distinto a otros. Es por esto, que este trabajo se va a centrar en el estudio de las variables más relacionadas con LTE como son las bandas de trabajo, el ancho de banda y el radio del sector dejando fijas las características relativas a las antenas de emisión y recepción, como puede ser las ganancias, potencias y factor de ruido. Esto se hace así, ya que la elección de la antena se considera menos importante que el estudio del rendimiento completo del sistema. Aun así, si se quisieran cambiar estos parámetros para probar con otra antena, se podría hacer sin problemas en el software implementado debido a que se ha diseñado para poder realizarse cambios de parámetros con facilidad.

### **3.3 Modelo de propagación, interferencias y factores atenuantes.**

El apartado que se presenta a continuación se va a centrar en mostrar cómo viaja la señal desde la estación base hasta la recepción en el tren. Vistas en el apartado anterior las variables que se manejan y el escenario sobre el que se va a trabajar, el siguiente paso es conocer el modelo de propagación de la señal que se va a emplear en la simulación. Con

esto se podrá ver como la señal se atenúa en el transcurso de su emisión. Pero además, hay que tener en cuenta los factores atenuantes que afectan a la señal en dicho recorrido, que añadiéndolos, va a permitir tener un resultado más preciso y parecido a la realidad.

### 3.3.1 Modelo de propagación

Un modelo de propagación es una ecuación matemática que intenta predecir la pérdida de señal en el transcurso de ésta. Para la construcción de los modelos se basan en modelos probabilísticos que miden el porcentaje de señal que llega a su destino. Algunos de estos se basan en miles de mediciones realizadas en un lugar de interés para posteriormente promediar los casos y establecer el modelo en esas circunstancias.

En el caso que ocupa este TFM se ha optado por elegir el modelo de propagación denominado “*Dual-Slope*”. Es un modelo que es usado comúnmente cuando la antena que transmite está varias longitudes de onda sobre el plano de tierra horizontal y además, es conveniente para escenarios con pocos obstáculos entre la transmisión y la recepción. Ambas circunstancias se producen en este proyecto, ya que no se espera ningún obstáculo entre la antena receptora y la antena emisora salvo el espacio libre y con una longitud de onda entre los 11,5 y 37,5 centímetros, los 8 metros de altura de la estación base hace que sea como mínimo 21 veces la longitud de onda más baja. Con esto, se puede concluir que es un modelo adecuado para la finalidad de este trabajo.

A continuación se muestran las ecuaciones que gobiernan este modelo [12]:

$$\begin{aligned} Lp(dB) &\approx Lb + 10n_1 \log_{10} \left( \frac{r}{Rb} \right) + \varepsilon_1 & \text{para } r \leq Rb \\ Lp(dB) &\approx Lb + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{r}{Rb} \right) + \varepsilon_2 & \text{para } r > Rb \end{aligned} \quad (1)$$

Se puede apreciar que es un modelo con dos ecuaciones, ambas iguales salvo el valor de  $n_1$  y  $n_2$  que determinan la pendiente con la que se comportan las pérdidas por propagación, de ahí el nombre de pendiente dual o “*Dual-Slope*”. El uso de una o de otra depende de si la distancia de estudio entre el emisor y receptor se encuentra más cerca o más lejos que el punto denominado de *Breakpoint* o  $Rb$ . Esto se hace así debido a que se ha estudiado que a partir del punto de ruptura se adapta mejor con otra pendiente.

Entrando en las variables que aparecen en las ecuaciones, aparece en primera instancia  $Lb$ , que son las pérdidas de propagación en el punto de ruptura o *Breakpoint*. Se calcula de la siguiente manera:

$$Lb(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10n_1 \log_{10}(Rb) \quad (2)$$

Siendo  $\lambda$  igual a:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$Rb$  o punto de *Breakpoint* igual a:

$$Rb = \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (4)$$

Donde  $h_b$  y  $h_m$  son la altura de la estación base en metros y de la antena en recepción en metros respectivamente. Se recuerda, que la altura de la antena en recepción coincide con la altura del tren debido a que la antena se coloca sobre éste por motivos explicados con anterioridad. Por lo tanto, el valor de ambos parámetros ya ha sido declarado en el apartado anterior.

Por otro lado,  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  son variables aleatorias Gaussianas de media cero y con una desviación típica  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente que representan el efecto de *Shadowing*. Este efecto se produce debido a los obstáculos que reducen el nivel de la señal captada por el receptor o si el emisor o bien el receptor, están en movimiento como es este caso. El valor de  $\sigma_1$  oscila entre los 3 y 4 dB, mientras que el de  $\sigma_2$  entre los 6 y 8 dB.

Para finalizar, solo quedaría por ver  $n_1$  y  $n_2$  que son los valores que determinan las pendientes para antes y después del punto de ruptura. Ambos valores dependen del entorno y en nuestro caso es espacio libre. Según esto, el valor de  $n_1$  se encuentra entre 2 y 2,25 mientras que  $n_2$  es mayor y oscila entre 4 y 5.

A continuación se adjunta una tabla resumen de los valores típicos y las ecuaciones para agilizar posibles consultas sobre aspectos relacionados con el modelo de propagación:

<b>Modelo de propagación</b> <i>Dual-Slope</i>	$Lp(dB) \approx Lb + 10n_1 \log_{10} \left( \frac{r}{Rb} \right) + \varepsilon_1 \quad \text{para } r \leq Rb$ $Lp(dB) \approx Lb + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{r}{Rb} \right) + \varepsilon_2 \quad \text{para } r > Rb$
<b>Cálculo de</b> <i>Lb(dB)</i>	$Lb(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10n_1 \log_{10}(Rb)$
<b>Fórmula de</b> <i><math>\lambda</math></i>	$\lambda = \frac{c}{f}$
<b>Rb o punto de</b> <b>Breakpoint</b>	$Rb = \frac{4h_b h_m}{\lambda}$
<b><math>\sigma_1</math></b>	3 - 4 dB
<b><math>\sigma_2</math></b>	6 - 8 dB
<b><math>n_1</math></b>	2 - 2.25
<b><math>n_2</math></b>	4 - 5

**TABLA 3-II: Fórmulas y valores típicos relativos al modelo de propagación.**

### 3.3.2 Interferencias

Además de las pérdidas de propagación se puede producir un degradado de la señal debido a las interferencias. Se denomina interferencia al fenómeno que ocurre cuando dos o más ondas ocupan el mismo espacio al mismo tiempo, esto puede producir que una interfiera a la otra y la calidad de ambas señales baje. Por lo tanto, es un factor relevante y a tener en cuenta a la hora de simular el transcurso de la señal.

En un escenario donde se disponen de varias antenas seguidas a una distancia determinada con el fin de dar cobertura a lo largo de la vía de tren, hace que sea necesario el estudio de las interferencias que hacen las señales emitidas por antenas próximas. Con el propósito de tener un resultado lo más ajustado y preciso posible, se han considerado un total de 10 interferencias de antenas venideras siguiendo la siguiente distribución:

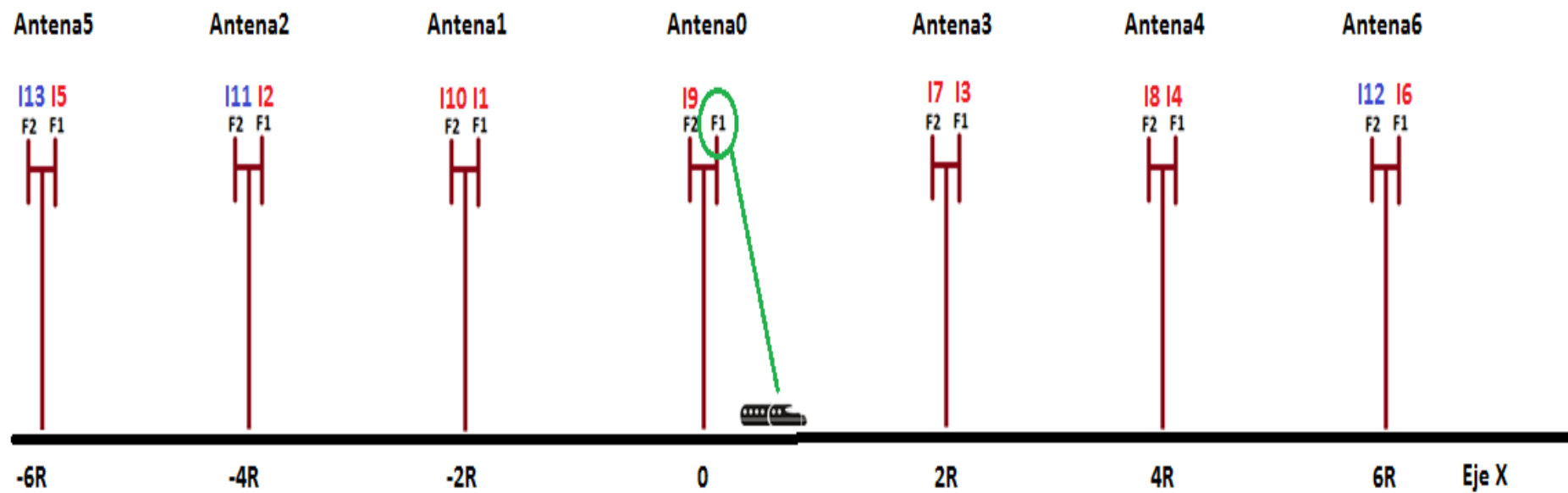
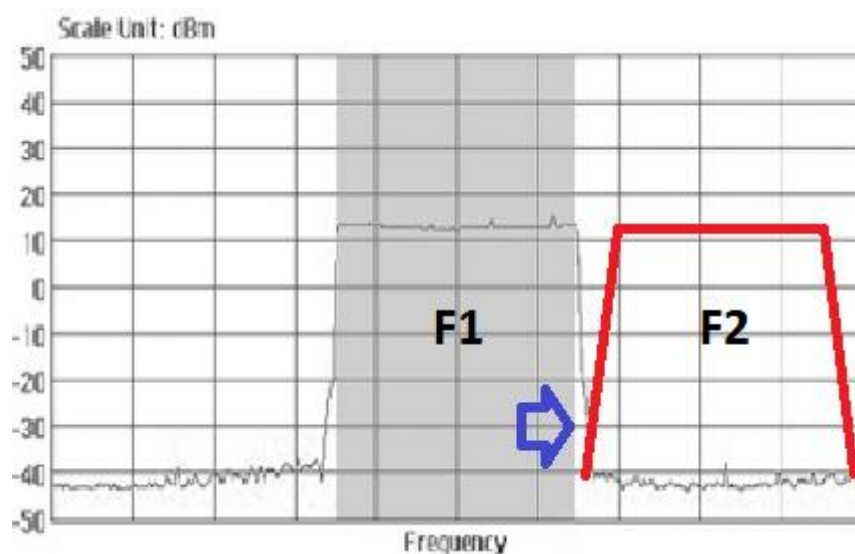


FIGURA 3-II: Escenario de interferencias

En el centro, en color verde, aparece la señal emitida que denominaremos como la señal de transmisión deseada. Tal y cómo se ha comentado en el apartado [3.2.1](#), esta señal emite a una frecuencia F1 y siempre dando cobertura dentro del punto 0 al punto R de radio. Por otro lado, en rojo, se pueden ver los índices de las interferencias que se van a estudiar. Las interferencias 1, 2, 3, 4, 5 y 6 transmiten con la misma frecuencia que la señal deseada y las interferencias 7, 8, 9 y 10 transmiten con frecuencia F2. Esa sería la frecuencia con la que se transmitiría a los trenes que circulan dentro del radio del sector pero en la parte situada a la izquierda de la antena. Las interferencias que aparecen en azul se han despreciado debido a que por su lejanía y otras consideraciones técnicas no afectan apenas como señal interferente y el resultado casi no varía incluyéndolas. Pero sin embargo si aumentaba la carga computacional y es por esto que se ha considerado eliminarlas de la simulación.

En el apartado siguiente se verá cómo afecta que la interferencia sea de F1 o F2 a la hora de calcular cuantitativamente en decibelios. Sin embargo, si es importante conocer previamente el fenómeno denominado *Leakage*. Se produce debido a emitir en bandas próximas, como es en este caso, F1 y F2. Esto hace que, a pesar de disponer de filtros realmente precisos y buenos, parte de la señal de una frecuencia se incorpore en el espectro de la banda adyacente haciendo que disminuya la calidad de la señal. Por lo tanto, es un problema que afecta a las interferencias provenientes de F2 a F1. De nuevo, en el apartado siguiente se verá cómo afecta cuantitativamente pero es a continuación donde se verá como obtener el valor.

En los extremos del ancho de banda en LTE se deja cierto espacio para evitar interferencias entre las bandas adyacentes, concretamente un 5% en cada lado. Este espacio se denomina banda de guarda y permite que la señal en recepción llegue con menos ruido a cambio de no utilizar esa parte para transmisión de datos. Sin embargo, siempre hay emisiones de la banda adyacente que consiguen introducirse en la señal emitida a pesar de la banda de guarda, esto es el *Leakage* o fuga en español. Este valor se puede aproximar en términos de potencia para tenerlo en cuenta a la hora de calcular las interferencias. Para calcularlo se dispone de una imagen de una señal LTE junto con su banda adyacente:



**FIGURA 3-III: Leakage**



Se puede ver que la señal, pasado un umbral de potencia, comienza a introducirse en la banda adyacente, tanto por parte de F1 como de F2. Ese punto es en torno a los -30dBm y contando con que el máximo se encuentra en aproximadamente en los 12 dBm, se puede decir que el *Leakage* se produce a unos 42 dB por debajo del máximo de la señal. Eso quiere decir que se producirá una fuga 42 dB menor a la potencia de la señal de F2 hacia F1. Este aspecto se tiene que tener en cuenta para el cálculo de las interferencias.

### 3.3.3 Factores atenuantes

Además de las interferencias existen otros aspectos que hacen que la señal se atenúe en el escenario de estudio:

- **Ruido en el sistema:** En todos los sistemas de telecomunicaciones existe siempre ruido en la señal y en este problema no iba a ser menos. Es por eso que hace falta tenerlo en cuenta para disponer de una buena solución y no esperar que éste no se produzca. En el apartado [3.2.2](#) se comentó como la figura de ruido tenía un valor cercano a los 7dB. Es ahora cuando se necesita aplicar para calcular el ruido del sistema:

$$N_{dB} = -114 + 10 \log_{10}(0.92 \times BW) + NF \quad (5)$$

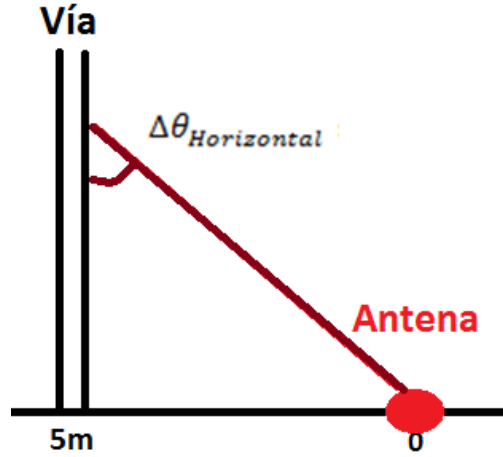
Esta fórmula de cálculo de ruido al completo, salvo el 0,92, proviene de la materia de Sistemas de Transmisión de Audio y Video (STAV) y que se retoma en la asignatura del máster de Comunicaciones Móviles, Satélite y Redes de Acceso (CSMRA), ambas impartidas por Bazil Taha. El 0,92 que aparece multiplicando al ancho de banda es debido a que dentro de la banda de frecuencia no se utiliza todo el ancho de banda. En caso del LTE, el ancho de banda útil es de un 90%, pero se pone un 92% debido a que es el ancho que adquiere el filtro de frecuencia intermedia.

- **Ganancia de la antena transmisora:** En el apartado [3.2.2](#) se ha visto que la antena en transmisión dispone de una ganancia de unos 12dB. Sin embargo, ese es el valor en el punto máximo, esto quiere decir, que a medida que nos alejamos de ese punto máximo, la ganancia de transmisión va disminuyendo. Para gobernar ese fenómeno se utiliza la siguiente fórmula:

$$Gtx_{dB}(\Delta\theta) = \max[Gtx_{max} - 12 \left( \frac{\Delta\theta_{Hor}}{\theta_{-3dB}} \right)^2 - 12 \left( \frac{\Delta\theta_{Vertical}}{\theta_{-3dB}} \right)^2, Gtx_{max} - SLL] \quad (6)$$

Donde  $SLL$ ,  $Gtx_{max}$  y  $\theta_{-3dB}$  ya se comentaron sus valores en [3.2.2](#). Por otro lado,  $\Delta\theta$  es la variación del ángulo que se forma respecto al punto máximo de ganancia mientras el tren se encuentra en movimiento. Para utilizar  $\Delta\theta$  se necesita descomponer en sus componentes vertical y horizontal y se aplica por separado, como se ve en la fórmula.

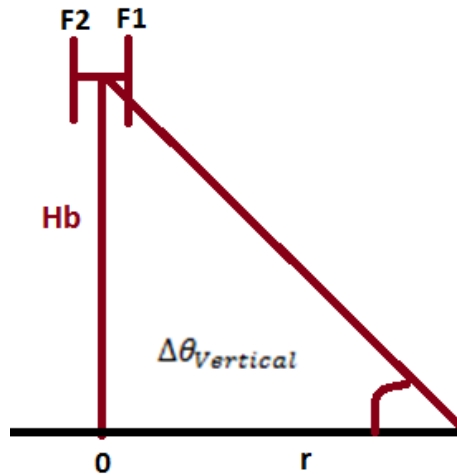
Para obtener  $\Delta\theta_{Horizontal}$  se sigue el siguiente esquema que dispone de una vista como si se mirase la antena desde el cielo hacia la tierra:



**FIGURA 3-IV: Cálculo  $\Delta\theta_{Horizontal}$**

$$\Delta\theta_{Horizontal}(r) = \tan^{-1}\left(\frac{D_{hor}}{r}\right) \quad (7)$$

Una vez se dispone de  $\Delta\theta_{Horizontal}$  se puede proceder al cálculo de la  $\Delta\theta_{Vertical}$ . El esquema que se muestra a continuación es como si se viese el escenario desde un lateral:



**FIGURA 3-V: Cálculo  $\Delta\theta_{Vertical}$**

$$\Delta\theta_{Vertical}(r) = \tan^{-1}\left(\frac{Hb}{r}\right) \quad (8)$$

### 3.4 Medidas de calidad de la señal: SNR y SINR

Para comenzar, se escoge el SNR (*Signal to Noise Ratio*). El SNR es una medida utilizada en ciencia e ingeniería que compara el nivel de la señal deseada con el de la señal de ruido. Se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Este margen es medido en decibelios. Por otro lado, el ancho de banda, la capacidad de canal y el SNR están relacionados por el teorema de Shannon-Hartley. El SNR se calcula de la siguiente manera:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(P_{señal}) - 10 \log_{10}(P_{ruido}) = Srx_{dB} - N_{dB} \quad (9)$$

En cuanto al SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) es otra medida también usada para comparar y establecer límites de calidad muy similar al SNR también calculada en decibelios. La diferencia que existe entre ambos, es que el SINR tiene en cuenta también las señales interferentes en su fórmula:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(P_{señal}) - 10 \log_{10}(P_{ruido}) - 10 \log_{10}(P_{interferencias}) \quad (10)$$

Pero en el caso que ocupa este proyecto, no se utilizará esta fórmula de SINR, sino la “SINR móvil”. Se escoge esta fórmula debido a que tiene en cuenta el desplazamiento Doppler de la señal. Este fenómeno se produce en escenarios donde la emisión o recepción de la señal es en movimiento, como es el caso de un tren de alta velocidad. Su fórmula es:

$$SINR_{móvil} = \frac{\left| \frac{\sin(\pi * \Delta)}{N * \sin\left(\frac{\pi}{N} * \Delta\right)} \right|^2}{1 - \left| \frac{\sin(\pi * \Delta)}{N * \sin\left(\frac{\pi}{N} * \Delta\right)} \right|^2 + \frac{1}{SNR_{Real}}} \quad (11)$$

N es el número de bloques que se encuentran disponibles en la banda de frecuencia utilizada para transmitir y  $\Delta$  es un factor dependiente de la frecuencia de Doppler.

Para calcular el número de bloques (N) se tiene que seguir el siguiente procedimiento:

1. El espacio entre subportadoras, tal y como se indica en la Tabla III, es de 15 KHz. Cada bloque tiene un total de 12 portadoras. Eso hace que un bloque tenga 180 KHz.
2. Conocido lo que ocupa cada bloque, solo queda dividir el espacio total de la banda, cuyos valores posibles aparecen en la Tabla III, entre el espacio de cada bloque. Eso dará como resultado el número de bloques en la banda. Por último, puntualizar que el ancho de la banda tiene que ser el ancho útil, es decir, el 90% del ancho de banda total.

Mientras que para calcular  $\Delta$  se sigue la siguiente fórmula:

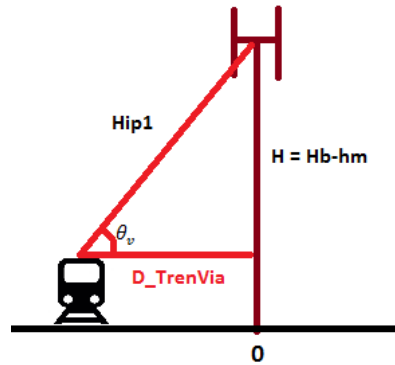
$$\Delta = \frac{Freq\_Doppler}{Dist\_portadoras} \quad (12)$$

Donde el único dato que no se conoce es la frecuencia de Doppler que se calcula así:

$$Freq_{Doppler} = \frac{Velocidad}{\lambda} * \Delta\theta(r) \quad (13)$$

Por otro lado, es necesario calcular  $\Delta\theta(r)$ . En este caso, este ángulo es compuesto. Esto quiere decir que no se puede descomponer en parte horizontal y vertical. Es por esto que se considera importante conocer cómo se obtiene  $\Delta\theta(r)$ :

1. El primer paso es conocer el ángulo que se forma en el plano vertical para posteriormente obtener la hipotenusa:



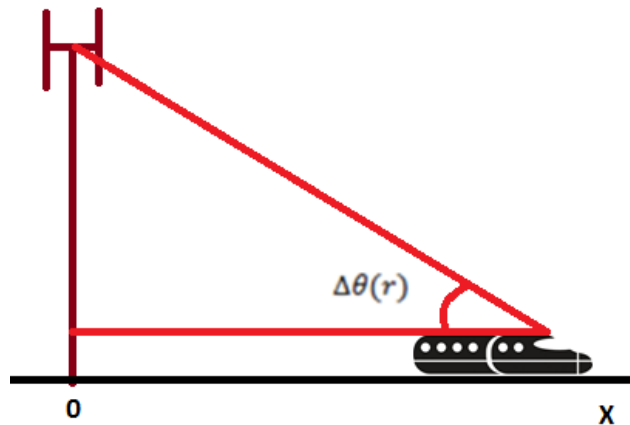
**FIGURA 3-VI: Cálculo hipotenusa plano vertical**

Con la distancia del tren a la vía ( $D_{TrenVia}$ ) y el cálculo de la altura relativa ( $H$ ) de la estación base respecto al tren se puede obtener la hipotenusa ( $Hip1$ ).

2. Conocida la primera hipotenusa y sabiendo en qué posición  $r$  se encuentra el tren, se disponen de los datos necesarios para calcular  $\Delta\theta$  mediante la siguiente ecuación trigonométrica:

$$\Delta\theta(r) = \tan^{-1}\left(\frac{Hip1}{r}\right) \quad (14)$$

Para que se vea mejor, a continuación se deja un esquema del ángulo calculado:



**FIGURA 3-VII: Cálculo de  $\Delta\theta(r)$**

Hay que tener en cuenta que el dibujo en 2D no permite ver la profundidad y hay que recordar que se ha tenido en cuenta la distancia entre la vía y el tren como se puede ver en la Figura 3-VI.

### 3.5 Cálculo de SNR, SINR y tasa binaria en recepción

Conocidos todos los elementos que afectan de una manera u otra al problema, se puede pasar a ver cómo se han utilizado y de qué manera se han secuenciado para el desarrollo del software de simulación. Con esto se podrán seguir los pasos que se han dado para

obtener la tasa binaria, es decir, lo que sería la capacidad del canal en un escenario para trenes de alta velocidad con el estándar de comunicaciones LTE. Este sería el primer paso para tener una primera idea sobre el rendimiento en este tipo de escenarios. Para ello, la explicación se va a apoyar en partes del código para que sea más comprensible.

Primeramente se necesita definir el conjunto de variables que se ha ido viendo a lo largo de este capítulo y que la mayoría se encuentra en el apartado [Parámetros del problema](#) y en las tablas 3-I y 3-II. De entre ellas se muestra a continuación los parámetros que van a poder ser modificados de cara al apartado de resultados:

```
% Parámetros de estudio
velocidad_kmh=500;           % km/h
f_Ghz = 2.6;                 % GHz
Ancho_banda_nominal = 20;    % MHz (banda real=> 18Mhz)
velocidad_ms=velocidad_kmh*1000/3600; % m/s
```

Donde el valor de la velocidad podrá variar entre los 250 y 500 km/h, la frecuencia se podrá modificar siempre en cuando se seleccionen frecuencias de las bandas disponibles de LTE y el ancho de banda se podrá elegir entre la gama que permite LTE.

A continuación, el siguiente paso que se realiza tras la declaración de variables, es el cálculo del punto de *Breakpoint*. Este valor es necesario conocerlo debido a que es fundamental por su uso en el modelo de propagación. Para su cálculo se sigue la fórmula número (4):

```
% Calculo Rb
hb=8;           % Altitud BS en metros
hm=4.1;         % Altitud Antena Tren en metros
lambda = 0.3/f_Ghz; % Metros
Rb=4*hb*hm/lambda;
```

De seguido, se obtiene el valor del ruido (N) tal y como se indicó en [3.3.3](#):

```
NF=7;           % Factor de ruido (dB)
N = -114+10*log10(0.92*Ancho_banda_nominal)+NF; % Ruido en dB
```

Obtenido el punto de ruptura y el valor del ruido en decibelios, y como paso previo a entrar en el bucle principal del código, se necesita calcular el número de bloques, ya que es independiente de la posición en la que se encuentra el tren y es más óptimo que introducirlo en el bucle. Siguiendo el proceso explicado al final del apartado [3.4](#) se implementa lo siguiente:

```
Dist_portadoras = 15*10^3; % Separación entre portadoras en Hz
Longitud_Rb = Dist_portadoras*12;% Longitud del bloque (12 subportadoras)
ancho_banda_real=Ancho_banda_nominal*0.9; % MHz
NBloques = ancho_banda_real*(10e6)/Longitud_Rb;% Bloques en la banda
```

A continuación, se pasa a explicar el *core* del programa, el bucle principal de cálculo de SNR y SINR:

Antes de empezar, hay que remarcar que el bucle simula el transcurso del tren desde debajo exactamente de la antena transmisora (Punto 0) hasta el borde del radio de cobertura de dicha antena (R). Se ha hecho que cada iteración del bucle aumente de un

metro en un metro para poder observar en cada momento del viaje los cambios que se producen en la señal. Conocido esto, a continuación se presenta el contenido del bucle:

- Primero se obtienen las pérdidas de propagación de acuerdo al modelo “*Dual-Slope*” que se rige por las fórmulas de (1):

```
% Cálculo pérdidas señal deseada
Lb=20*log10(4*pi/lambda)+10*n1*log10(Rb);
if r<=Rb
    Lp=Lb+10*n1*log10(r/Rb)+shadow1;
elseif r>Rb
    Lp=Lb+10*n2*log10(r/Rb)+shadow2;
end
```

- Siguiendo con el modelo de propagación, ahora se necesita calcular las pérdidas por desvanecimiento de señal aplicadas a las interferencias vistas en [3.3.2](#). Para cada una de ellas se tiene que aplicar el modelo, es por esto que solo se muestra para una de ellas:

```
% Cálculo pérdidas señal Interferencia 1
if R*2+r<=Rb
    Lp1=Lb+10*n2*log10((R*2+r)/Rb)+shadow1;
else
    Lp1=Lb+10*n2*log10((R*2+r)/Rb)+shadow2;
end
```

En este caso, es la interferencia 1 (I1), situada a la izquierda de la antena de transmisión deseada según la Figura 3-II. En el *if* se indica la distancia que existe con la antena principal ( $R^2$ ) sumado a la posición instantánea del tren ( $r$ ). En este caso, al circular hacia la derecha el tren, se aleja de I1, de ahí el signo +. Si el tren se acercase hacia la interferencia de estudio, como el caso de I3, el signo que acompañase a  $r$  sería negativo.

- Con todas las pérdidas de propagación calculadas, el siguiente paso es obtener la ganancia de la antena transmisora en función de la posición del tren. Como se ha visto en [3.3.3](#), la ganancia en transmisión depende del ángulo que se forma respecto al punto máximo de apuntamiento. Es por esta razón que primero se calcula dicho ángulo y después la ganancia de la antena. En el código se encuentra de la siguiente manera:

```
% Calculo ángulo Theta Vertical y Horizontal
theta_h(r) = atand(d_hor/r);
theta_v(r)=atand(hb/r); % Calculo ángulo Theta

% Cálculo Gtx según posición del tren frente a la BS
Gtx_pos = max(Gtx_dB-12*(theta_h(r)/theta_3dB)^2-
12*(theta_v(r)/theta_3dB)^2 , Gtx_dB-SLL);
```

- Ya se dispone de la potencia en transmisión, de la ganancia en transmisión y en recepción y las pérdidas de propagación, todo ello habiendo tenido en cuenta la posición instantánea del tren. Con esto ya se puede obtener la potencia de la señal en recepción:

```
Srx=Ptx_dBm+Gtx_pos+Grx_dB-Lp;
```

En cuanto a las interferencias se producen varias casuísticas para el cálculo de potencia de la señal:

1. Interferencias I1, I2 e I5: Son interferencias cuya frecuencia es la misma que la de emisión (F1) y que su apuntamiento es directo hacia la zona de señal deseada. Eso hace que el único atenuante de la señal sean las pérdidas por propagación. Ejemplo para I1:

$$I1 = P_{tx\_dBm} + G_{tx\_dB} + G_{rx\_dB} - L_{pi1};$$

2. Interferencias I3, I4 e I6: También emiten con frecuencia F1 pero su disposición hace que no afecten con su lóbulo principal de apuntamiento sino que interfieren con los lóbulos traseros. En el peor de los casos para la señal deseada se traduce en que la potencia máxima de interferencia sea igual a la potencia mayor del lóbulo secundario, esto es restar el SLL:

$$I3 = P_{tx\_dBm} + G_{tx\_dB} - SLL1 + G_{rx\_dB} - L_{pi3};$$

3. Interferencias I7 e I8: Ambas transmiten con F2 pero de manera directa. Que sea F2 implica que la interferencia sea menor que si viniese de F1. En el apartado de [Interferencias](#) se explica el fenómeno de *Leakage* y como se calcula. Como recordatorio, el *Leakage* es el punto en potencia del espectro donde comienza a afectar la interferencia de la banda adyacente como valor máximo. Esto quiere decir que se necesita restar ese valor a la potencia de la señal interferente:

$$I7 = P_{tx\_dBm} - Leakage + G_{tx\_dB} + G_{rx\_dB} - L_{pi7};$$

$$I8 = P_{tx\_dBm} - Leakage + G_{tx\_dB} + G_{rx\_dB} - L_{pi8};$$

4. Interferencias I9 e I10: Es la unión de los casos 2 y 3. Emiten con el lóbulo secundario, por lo tanto es necesario restar el valor del SLL a la potencia de la señal y además, emiten a F2 por lo tanto, interactúan con la señal deseada con *Leakage*. Esto se traduce en:

$$I9 = P_{tx\_dBm} - Leakage + G_{tx\_dB} - SLL1 + G_{rx\_dB} - L_{pi9};$$

$$I10 = P_{tx\_dBm} - Leakage + G_{tx\_dB} - SLL1 + G_{rx\_dB} - L_{pi10};$$

Las interferencias I11, I12 e I13 que aparecen en el esquema se deciden obviar debido a que se observó que apenas tenían impacto en la señal deseada y se prefirió eliminarlas para poder restar carga al proceso de simulación.

- Con el valor calculado de las interferencias y de la señal deseada, solo queda calcular el SNR (fórmula 7) y posteriormente el SINR móvil (fórmula 9). Para ello, se sigue el siguiente procedimiento habiendo pasado previamente la señal deseada y las interferentes a números reales:

```
% Calculo SNR_real
SNR(r)=10*log10(Srx_real/
(N_real+Icc1_real+Icc2_real+Icc3_real+Icc4_real+Icc5_real+Icc6_real
+Icc7_real+Icc8_real+Icc9_real+Icc10_real));

SNR_real(r)=10^(SNR(r)/10);
```

```

% Calculo SINR movil
Numerador=sin(pi*delta);
Denominador=(NBloques*sin(pi*(delta/NBloques)));
CC=(Numerador/Denominador)^2;
SINR_MOVIL(r)=10*log10(CC/(1-CC+(1/SNR_real(r))));

```

- Disponible el SINR para una determinada posición solo quedaría mirar la tabla para encontrar que MCS dispone y asociarle una tasa binaria. Por ejemplo, si se tuviese un valor de SINR de 5 dB tendría un MCS de 6. Esto indica que utiliza la codificación QPSK, teniendo dos bits por símbolo y con una codificación de 0,55. Esto es equivalente a  $2\text{bits} \cdot 0,55(1/\text{Hz}) = 1,1 \text{ bps/Hz}$ , donde bps son bits por segundo. En definitiva, la tabla con la tasa binaria sería la siguiente:

MCS	Modulation	Bits per symbol	Coding Rate	Bps/Hz	SINR (dB)
0	-	-	-	-	<-3.4
1	QPSK	2	0,17	0,34	-3.4
2	QPSK	2	0,23	0,46	-2.3
3	QPSK	2	0,29	0,58	-1.4
4	QPSK	2	0,36	0,72	-0.4
5	QPSK	2	0,45	0,9	0.8
6	QPSK	2	0,55	1,1	2.7
7	QPSK	2	0,64	1,28	5.3
8	16QAM	4	0,5	2	6.8
9	16QAM	4	0,55	2,2	7.5
10	16QAM	4	0,62	2,48	8.5
11	16QAM	4	0,72	2,88	10
12	16QAM	4	0,8	3,2	11.4
13	64QAM	6	0,64	3,84	14
14	64QAM	6	0,68	4,08	14.5
15	64QAM	6	0,76	4,56	15.8
16	64QAM	6	0,82	4,92	17.1
17	64QAM	6	0,91	5,46	19.8

**FIGURA 3-VIII: MCS con tasa binaria**

- Sabiendo la tasa binaria por Hz el siguiente paso es multiplicar por el ancho de banda útil de la señal. Este ancho de banda es el 90% de los posibles valores que dispone LTE (1.4 - 3 - 5 - 10 - 15 - 20 MHz). El 90% proviene de que el 10% restante se utiliza como espacio de guarda para evitar el *Leakage* e interferencias con frecuencias cercanas.  
En definitiva y como ejemplo, si se escoge un ancho de banda de 20MHz y se tiene un MCS de 17, la tasa binaria resultante sería de  $0,9 \cdot 20 \text{ MHz} \cdot 5,46 \text{ bits/Hz} = 98,28 \text{ Mbps}$ .
- Pero sin embargo, esta no sería la tasa binaria real, ya que faltaría por incluir dos atenuantes más de la tasa binaria, como son la configuración TDD y la acción del prefijo cíclico, el piloto y los datos de acceso aleatorio.



- Configuración TDD: Como se vio en el apartado de LTE en la [sección de duplexación](#) la configuración que se elija determina el tiempo que se utiliza el enlace dirección Downlink o Uplink. Esto significa que hay que tener en cuenta la configuración elegida a la hora de obtener la tasa binaria útil.

Esto se consigue mediante:

```

if configuration==0
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(2/5);
elseif configuration==1
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(3/5);
elseif configuration==2
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(4/5);
elseif configuration==3
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(7/10);
elseif configuration==4
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(8/10);
elseif configuration==5
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(9/10);
else
    BinaryRateNetaNeta1=BinaryRateNetaBruta.*(5/10);
End

```

Donde los porcentajes que multiplican se obtienen de ver cuál es la parte proporcional de *Downlink* en cada una de las configuraciones.

- Prefijo cíclico: Dentro de OFDM hay un mecanismo denominado prefijo cíclico que se utiliza para evitar problemas con el multitrayecto de la señal. Consiste en dejar un tiempo de guarda en los símbolos emitidos con el fin de que el símbolo anterior no interfiera en el siguiente debido al multitrayecto. El valor del tiempo de guarda se ha estudiado de manera concienzuda para evitar que este fenómeno se produzca y también para evitar perder ancho de banda con un prefijo cíclico demasiado largo. En concreto LTE permite elegir entre prefijo largo y corto según la robustez que se le quiera otorgar al sistema. El habitual es el corto y tiene una ocupación de un 6,66% de la tasa binaria. Valor que habría que restar a la tasa binaria útil.
- Piloto: Dentro de LTE existen pequeñas señales de referencia que se usan para la demodulación cuando el enlace es de bajada. Estas señales que se transmiten se denominan señales piloto y ocupan el 14,3% del ancho de banda. Al no ser datos útiles para el usuario final, no se tienen que considerar como tasa binaria útil. Por lo tanto, habría que restar este porcentaje de la tasa binaria calculada.
- Acceso aleatorio: Son los datos que se utilizan para la sincronización entre el receptor y el emisor y que por lo tanto tampoco serían datos útiles. El porcentaje es un 0,625%, un valor realmente pequeño pero aun así se tiene en cuenta.

Estos tres últimos aspectos se tienen en cuenta de la siguiente manera:

```
BinaryRateNetaNetaNeta=porcentajeDL(BinaryRateNetaNeta1);
```

Donde `porcentajeDL` es:

```
function [out]=porcentajeDL(binaryrate)
    pilotoverhead=0.143;
    commonchaneloverhead=0.10;
    CPoverhead=0.10;
    out=binaryrate.*((1-pilotoverhead)*(1-commonchaneloverhead)*(1-
    CPoverhead));
```

Y teniendo en cuenta todos esos factores y atenuantes es con lo que se termina la extracción de la tasa binaria para el problema y con ello, la explicación del desarrollo del software de simulación.

Cabe recalcar, que el código que se ha incluido para la explicación de este apartado es una extracción del código básico completo implementado. Es decir, no se encuentra todo el código del programa habiéndose eliminado partes redundantes o que no se han considerado importantes en la explicación.

### **3.6 Conclusiones**

En este capítulo se ha conseguido plantear y exponer los aspectos básicos que se incluyen en el Software de simulación y se ha podido ver en detalle cuales son los pasos que se siguen dentro de la lógica implementada del programa. Además, la descripción de todo el conjunto de elementos del programa permite tener una idea del nivel de detalle y afinamiento que tiene el Software programado.

Con el programa básico preparado ya se puede avanzar al siguiente paso, que consiste en obtener resultados en diversas circunstancias y poder así extraer conclusiones sobre el rendimiento posible de LTE en infraestructuras ferroviarias de alta velocidad. Ampliando la funcionalidad del Software básico se pretende obtener un conjunto de resultados que permita un análisis completo y preciso de lo que sería aplicar LTE en infraestructuras que involucran trenes de alta velocidad. Todo esto y mucho más es lo que se mostrará en el capítulo cuarto.

## 4 Resultados

---

### 4.1 Introducción

Después de explicar en detalle cómo se ha desarrollado la solución, y comentado que factores afectan y de qué manera, solo queda poner a prueba al Software de simulación implementado. Este paso es fundamental para poder extraer resultados numéricos de la tasa binaria disponible por el tren en las distintas configuraciones de LTE.

Para poder extraer conclusiones más precisas sobre el rendimiento del LTE en este tipo de escenarios, se ha simulado en cada una de las configuraciones existentes de dicho estándar. Debido al gran número de resultados y combinaciones posibles solo se mostrarán las más relevantes. Eso sin tener en cuenta la velocidad, que al tener un rango tan elevado (250 a 500km/h), si se probasen todas las posibilidades junto con todas las configuraciones del estándar sería inabordable.

Al final, previo a las conclusiones del capítulo, se añadirá un apartado sobre que tecnología se propone para la distribución de la señal en el interior del vagón. Se ha escogido posicionar este apartado en este capítulo por diversos motivos que se explicarán más adelante.

### 4.2 Segmentación de resultados

A causa del gran abanico de posibilidades que existe para generar un resultado según configuración LTE y velocidad, se ha decidido segmentar los resultados en partes y temáticas. Cuando se habla de configuraciones LTE se está refiriendo a las posibilidades que otorga este estándar en la elección de la frecuencia central de la banda, el ancho de banda y la configuración TDD.

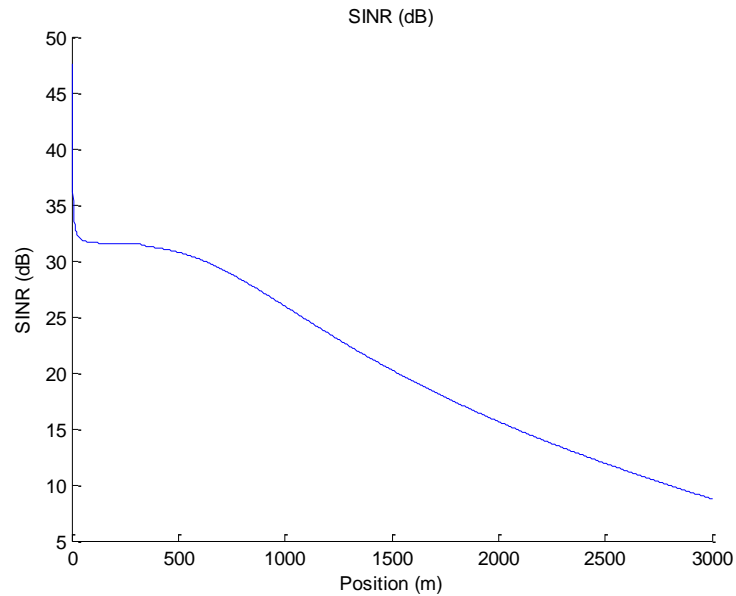
La segmentación de los resultados va a ser la siguiente:

- Paso de tasa binaria neta a tasa binaria neta real.
- De qué manera afecta la velocidad a la tasa binaria.
- Diferencias según frecuencia escogida.
- Máximo y mínimo rendimiento a velocidad máxima.
- Estudio de viabilidad económica a una tasa binaria neta requerida.

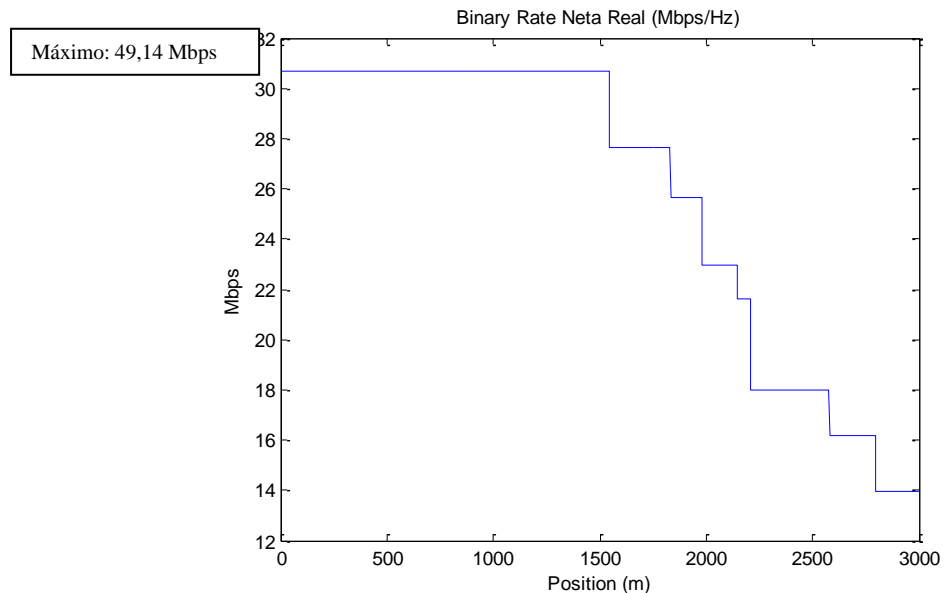
#### 4.2.1 Paso de tasa neta bruta a tasa binaria neta real

Como primer punto en los resultados, esta subsección tiene como fin poder ver cómo afectan cada uno de los factores atenuantes a la señal. Permitiendo así conocer cuales afectan más y cuales menos.

Se parte de la tasa binaria neta obtenida de una señal que trabaja a una frecuencia de 800 MHz, con un ancho de banda de 10MHz, para un radio de sector de 3000 metros y una velocidad del tren de 300km/h. Estos datos se han elegido de manera aleatoria ya que no es lo importante de este apartado sino ver el efecto de los atenuantes. La tasa binaria neta y el SINR serían los siguientes con estos datos:



**FIGURA 4-I: SINR**



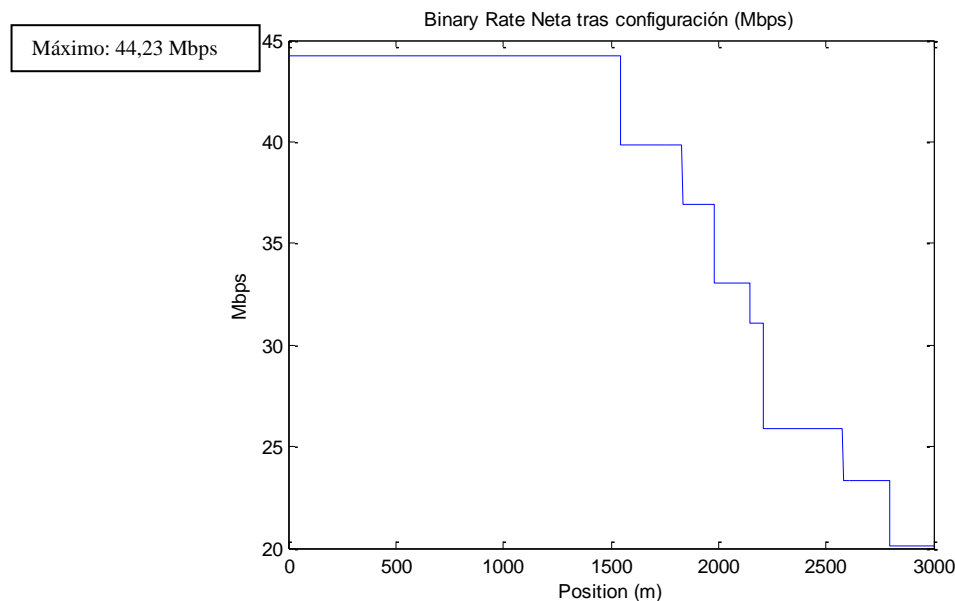
**FIGURA 4-II: Tasa binaria neta**

Es importante remarcar, que se va a considerar como tasa binaria neta a aquella que se obtiene tras calcular el valor de bps/Hz multiplicada por el ancho de banda real. Siendo la tasa binaria bruta el resultado sin ningún atenuante ni codificación. Es decir, multiplicar el ancho de banda de la señal total y multiplicarlo por el número de bits por símbolo que le correspondiese la modulación que tocara según el SINR.

En la imagen se pueden ver una serie de discontinuidades. Esos escalones se forman debido a que a medida que avanza el tren se va pasando de un MCS de la tabla a otro, bajando así el rendimiento de la señal a favor de ganar robustez en el envío. Otro aspecto reseñable es que la SINR va disminuyendo a medida que avanza el tren, pero no es hasta los 1500 metros aproximadamente cuando se baja la tasa binaria. Esto es debido a que hasta ese momento, la tasa que se puede entregar es máxima. Cuando desciende de los 19,8 dB es cuando se baja al MCS 16 y la tasa binaria desciende.

Llegados a este punto, habría muchos que se pararían y darían por bueno este resultado de tasa binaria útil, pero en realidad aún hay factores a tener en cuenta que disminuyen la tasa binaria neta.

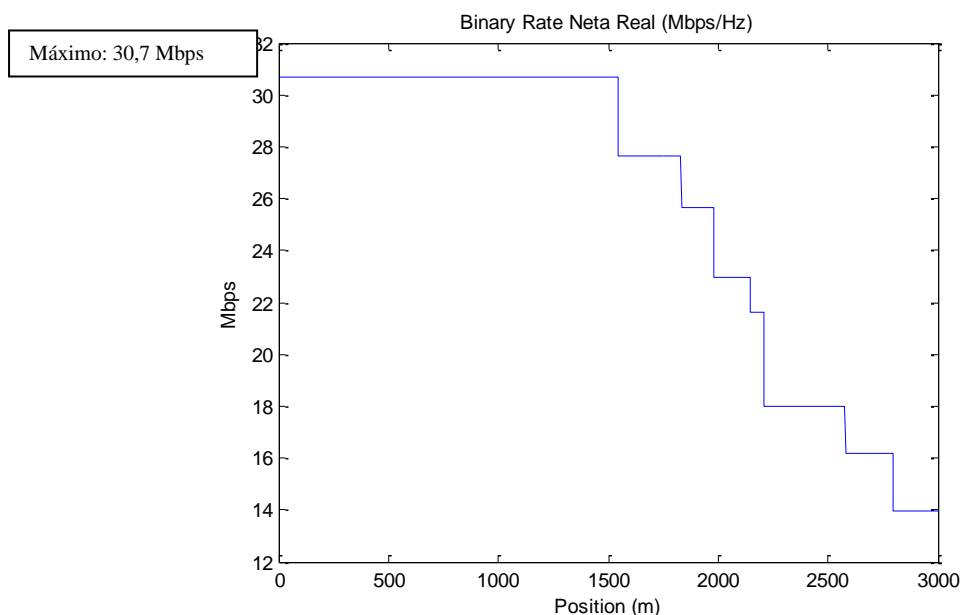
La siguiente causa a mostrar su efecto es la configuración TDD. Según el momento y la aplicación para la que se use el enlace, este puede variar el porcentaje de uso de *Downlink* y *Uplink*. Para este ejemplo se va a aplicar el mejor de los casos, es decir, la configuración número 5:



**FIGURA 4-III: Tasa binaria neta tras configuración**

Se puede apreciar que la bajada es considerable, haciendo descender el máximo casi 5 Mbps. Esa bajada sería en el mejor de los casos, ya que se ha elegido la configuración más beneficiosa para el Downlink dejando tan solo un 10% de tiempo para el Uplink. Esto muestra como de importante es elegir una configuración adecuada según la carga del enlace y según el tipo de aplicación. Pero aun así, incluso en el mejor de los casos, es un factor que afecta más que considerablemente al rendimiento y que si no se tuviese en cuenta no sería una simulación ajustada.

El siguiente paso consiste en ver cómo afecta la señal de piloto, el prefijo cíclico y el acceso aleatorio de manera cuantitativa al rendimiento del sistema. Aplicándolo al ejemplo elegido ocurre lo siguiente:



**FIGURA 4-IV: Tasa binaria neta real**

La tasa binaria neta se ha visto disminuida en casi 14 Mbps. Eso significa que todo ese ancho de banda se ha utilizado para la señalización, para guardar espacio entre símbolos y para los datos relativos el acceso aleatorio, viéndose la tasa binaria útil a tan solo 30,7 Mbps.

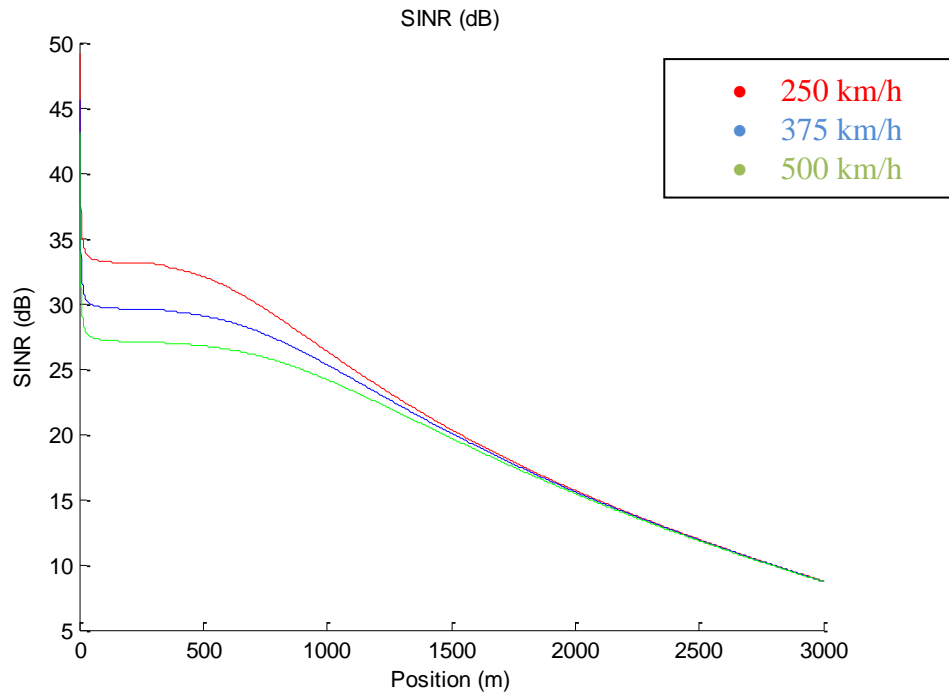
Si se echa la vista atrás, la tasa binaria bruta en este ejemplo para el mejor de los casos era  $6 \text{ bits/símbolo} * 1 \text{ bps/Hz} * 10 \text{ MHz}$  da a lugar a 60 Mbps y se ha podido ver que su decremento llega hasta los 30,7Mbps de tasa binaria útil. Eso significa que el rendimiento del sistema, con la mejor de las configuraciones TDD, es de 51,17% para este ejemplo.

Después de realizar varias simulaciones y medidas combinando los parámetros de LTE, se comprueba que el rendimiento para todos los casos se encuentra entre un 42 y un 55% para la configuración más optimista.

#### 4.2.2 De qué manera afecta la velocidad a la tasa binaria

Comprobado el bajo rendimiento existente entre la tasa binaria bruta y la real, se pasa a ver de qué manera afecta la velocidad. Se busca ver si de veras hay un límite que haga que el rendimiento se desvanezca o comprobar si en realidad no afecta tanto.

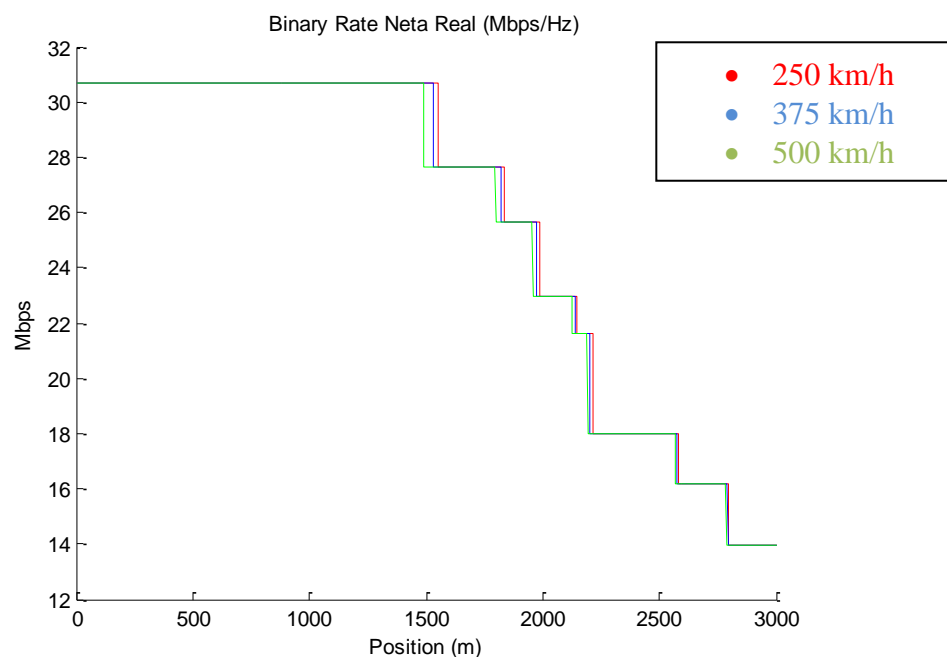
Para poder realizar una comparación más visual se muestra la SINR móvil y de seguido las tasas binarias reales para tres velocidades distintas. Se elige la velocidad más baja, 250 km/h, la más alta, 500 km/h y el punto medio de ambas, 375km/h, manteniendo el resto de parámetros igual al ejemplo del apartado anterior:



**FIGURA 4-V: SINR para tres velocidades**

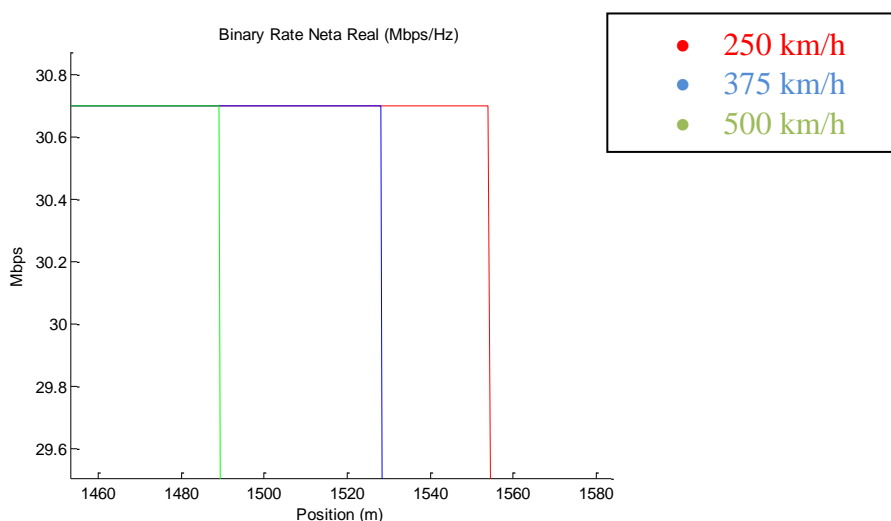
Con la figura que tenemos arriba se pueden extraer varias conclusiones. La primera de ellas es que el cambio hay una diferencia de casi 7dB entre el caso de 250km/h y el de 500km/h. A causa de esto, para 500 km/h, se tendrá un cambio a MCS con peor tasa binaria a distancias más cortas entre estación base y tren. La segunda conclusión es que la SINR disminuye más rápido entre 250km/h y 375km/h que de 375 a 500 km/h.

Vista la SINR se muestra el comportamiento en tasa binaria:



**FIGURA 4-VI: Comparativa tasa binaria a distintas velocidades.**

Como era de imaginar, el tren que circula a 500 km/h cambia antes de MCS a uno peor antes que los otros casos. Pero sin embargo, son apenas unos metros la distancia que les diferencia en el primer descenso. Si aumentamos la imagen se podrá ver mejor:



**FIGURA 4-VII: Zoom figura XVI**

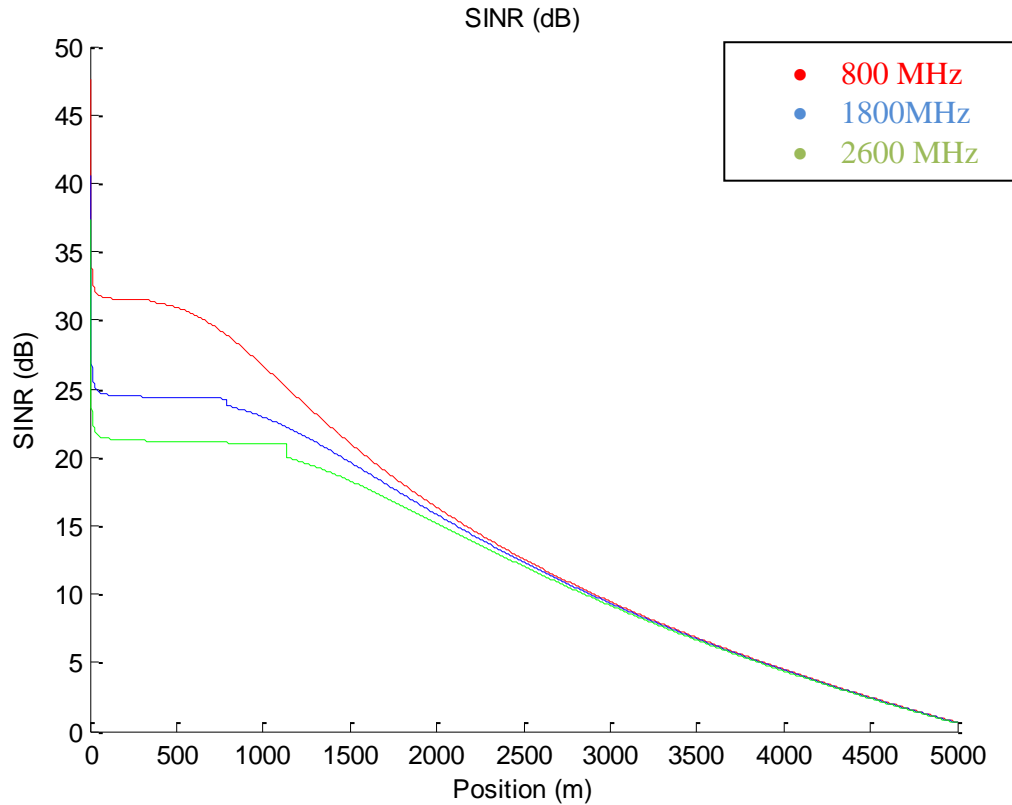
Es decir, es en apenas 65 metros donde hay un mayor MCS para el caso de 250 km/h en comparación con el de 500km/h. Considerando que fuese a 250km/h, el tiempo estimado de disponibilidad de esa mejora respecto a 500 km/h es de unos 0,47 segundos, un tiempo realmente despreciable. Esto se produciría en el mejor de los casos, es decir, en el primer escalón que es donde más diferencia se produce. Sin embargo, a medida que se alejan de la estación base, esta separación termina por desaparecer. Por lo tanto, se puede decir, que en términos tasa binaria, la velocidad no afecta casi.

#### 4.2.3 Diferencias según frecuencia escogida.

En España, como ya se comentó en el apartado [2.2 referido al estándar LTE](#), hay tres bandas en frecuencia disponibles para su utilización. Éstas son la bandas de 800 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz.

En esta subsección se persigue comprobar de qué manera afecta la elección de cada una de las bandas en términos de SINR y de tasa binaria. Para ello, se mostrarán las simulaciones de ambas medidas en recepción para las tres bandas en las mismas condiciones de estudio. Las condiciones serán las mismas que en el apartado [4.2.1](#).

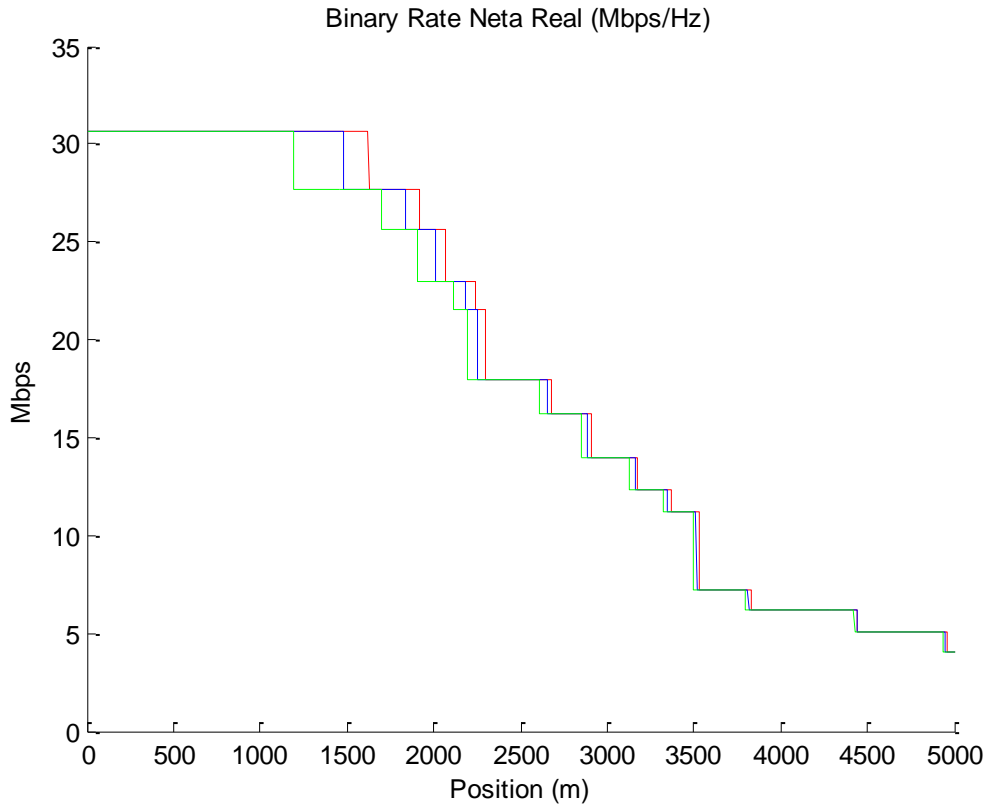




**FIGURA 4-VIII: SINR para distintas bandas de frecuencia**

El resultado de la simulación muestra como hay una diferencia de unos 10dB de diferencia entre la banda de 800 MHz y de 2600 MHz. Esto es debido a que cuanto más baja sea la frecuencia de la banda escogida hará que la  $\lambda$  sea más alta de acuerdo a la fórmula (3). El tener una  $\lambda$  más alta permitirá que el punto de ruptura o *Breakpoint* se encuentre más próximo a la posición de la antena de transmisión y esto hará que las pérdidas de propagación sean más bajas permitiendo un SINR más alto. Además en la figura se puede ver el fenómeno del *Breakpoint*, estando para 800 MHz en torno a los 400 metros, mientras que para 2600 MHz se encuentra pasados los 1200 metros.

Lo comentado en el apartado anterior va a hacer que haya diferencias en la tasa binaria útil en recepción:



**FIGURA 4-IX: Tasa binaria útil para distintas bandas**

Efectivamente, se puede apreciar una gran diferencia entre la posición de bajada para el caso de los 800 MHz (1624 metros) al de los 2600 MHz (1189 metros) en el primer escalón. La diferencia es de 435 metros, 6,7 veces más que en el caso de la velocidad visto en el apartado anterior. Sin embargo, al igual que ocurría con la velocidad, a medida que avanza el tren la diferencia en distancia entre pasos de MCS va disminuyendo hasta desaparecer prácticamente.

Por lo tanto, se puede concluir que la banda de frecuencia es un aspecto que afecta más tanto al SINR como a la tasa binaria que la velocidad. Esta información se debe de tener en cuenta cuando se desarrolle un sistema con LTE para trenes de alta velocidad ya que los resultados pueden ser muy distintos. Siempre que se pueda, hay que elegir la banda disponible más baja para LTE para obtener mejores rendimientos.

#### 4.2.4 Máximo y mínimo rendimiento a velocidad máxima.

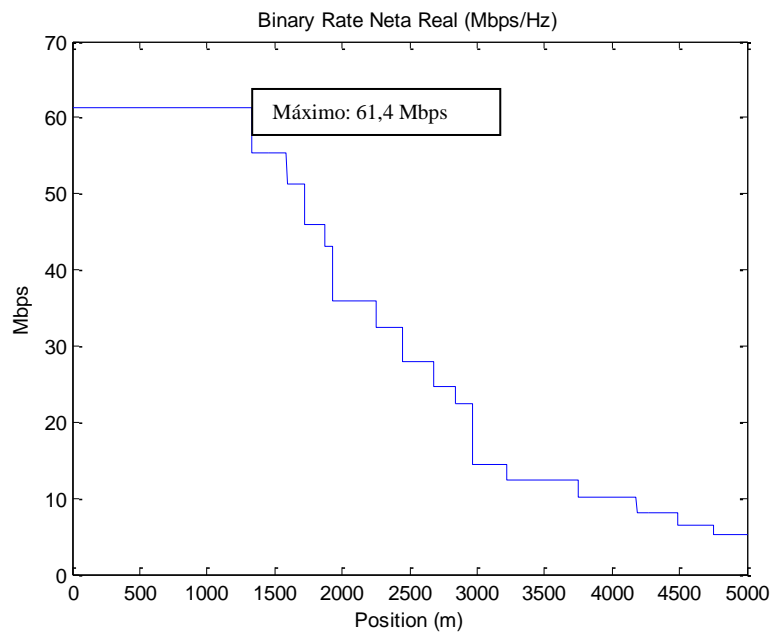
En subsecciones anteriores se ha podido ver cómo afecta la velocidad, la frecuencia y cómo se obtiene la tasa binaria útil, pero no se ha podido ver el rendimiento máximo, al igual que el mínimo, que podría otorgarse en un escenario de este tipo. En este aspecto, tiene un papel fundamental el ancho de banda escogido ya que, teóricamente cuanto mayor sea el ancho mayor será la tasa binaria.

El estudio se realizará para la velocidad máxima de estudio del problema, es decir, 500km/h. Para obtener mayor tasa binaria hay que saber cuáles son las mejores condiciones para ello según todas las posibilidades que brinda el 4G. Estas son:

- Frecuencia a 800 MHz.

- Ancho de banda de 20MHz.
- Configuración 5 de TDD.

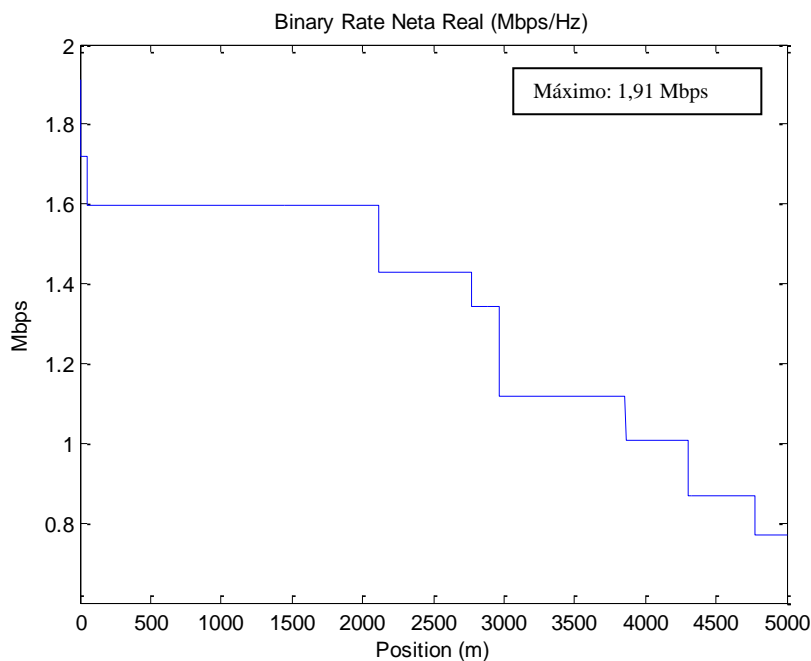
Según esto se obtiene lo siguiente:



**FIGURA 4-X: Tasa binaria útil máxima a 500 Km/h**

Se obtiene una tasa binaria útil de unos 61,4 Mbps durante más de 1300 metros. Lo que significa que para las circunstancias ideales se obtiene un resultado más que notable y que supera en casi 1500 veces en tasa binaria pico a la de GSM-R aunque puntualizando que GSM-R dispone de un ancho de banda mucho menor (0.2MHz).

En el peor de los casos, se obtiene:



**FIGURA 4-XI: Tasa binaria útil mínima a 500Km/h**

Considerando como peores condiciones un ancho de banda de 1,4 MHz a una frecuencia de 2600 MHz y con una configuración de tipo 0 de TDD se obtiene un máximo de 1,91 MHz. Esto significaría en comparación con GSM-R unas 44 veces mejor que el valor pico de tasa binaria para el estándar de segunda generación.

Por lo tanto, después de ver los resultados de esta subsección se puede extraer en claro que en términos de tasa binaria útil LTE mejoraría en cualquier caso el rendimiento dado por GSM-R. Estaría por encima incluso en las peores circunstancias y habiendo tenido en cuenta una velocidad de 500Km/h.

#### **4.2.5 Estudio de viabilidad económica a una tasa binaria neta requerida.**

Para finalizar este capítulo y con el fin de hacer más completo el estudio, se han realizado unas tablas que permitirían, a cualquier empresa instaladora de LTE, calcular el coste de la instalación en función de la calidad en términos de tasa binaria requerida que se necesite en los tramos.

En su realización se ha optado por obtener las tablas para las bandas de 800 MHz y 2600 MHz, ya que son las más habituales en España, y para anchos de banda disponibles superiores a 5MHz. Dentro de cada uno de esos casos, lo que se hace es obtener la tasa binaria neta y útil media en función de la extensión del radio del sector a una velocidad de 500km/h (el peor de los casos). Concretamente, se obtiene para sectores de 1000 metros a 5000 en pasos de 100 metros.

Para la banda de 800 MHz la tabla es la siguiente:

<b>Freq=0.8GHz</b>	<b>BW=5 MHz</b>		<b>BW=10 MHz</b>		<b>BW=20 MHz</b>	
<b>Radio del sector(m)</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>
1000	27,00	14,89	54,00	29,74	108,00	59,26
1100	27,00	14,88	54,00	29,69	108,00	59,08
1200	27,00	14,87	54,00	29,63	108,00	58,86
1300	27,00	14,85	54,00	29,55	108,00	58,58
1400	27,00	14,82	54,00	29,46	108,00	58,22
1500	27,00	14,79	54,00	29,35	107,21	57,67
1600	27,00	14,75	54,00	29,21	106,27	57,05
1700	27,00	14,71	53,89	29,03	105,27	56,41
1800	27,00	14,67	53,54	28,79	104,22	55,75
1900	27,00	14,61	53,15	28,53	103,15	55,08
2000	26,98	14,54	52,73	28,27	102,08	54,33
2100	26,83	14,44	52,29	27,99	101,04	53,57
2200	26,68	14,33	51,85	27,71	100,01	52,77
2300	26,51	14,22	51,39	27,42	99,03	51,92
2400	26,33	14,11	50,95	27,10	98,10	51,10
2500	26,14	13,99	50,51	26,78	97,21	50,23
2600	25,95	13,87	50,07	26,45	96,37	49,38
2700	25,76	13,76	49,66	26,09	95,57	48,51
2800	25,58	13,62	49,26	25,74	94,01	47,50
2900	25,39	13,49	48,88	25,39	92,21	46,47
3000	25,20	13,35	48,51	25,02	90,50	45,48
3100	25,03	13,21	48,16	24,66	88,89	44,50
3200	24,85	13,06	47,82	24,29	87,33	43,56
3300	24,68	12,91	47,24	23,88	85,87	42,67
3400	24,52	12,77	46,47	23,44	84,47	41,83
3500	24,36	12,61	45,74	23,02	83,16	41,03
3600	24,21	12,46	45,03	22,61	81,90	40,21
3700	24,06	12,31	44,35	22,19	80,71	39,43
3800	23,92	12,16	43,70	21,80	79,57	38,68
3900	23,70	11,99	43,08	21,42	78,48	37,97
4000	23,38	11,80	42,49	21,07	77,45	37,26
4100	23,06	11,62	41,92	20,72	76,47	36,57
4200	22,75	11,45	41,38	20,38	75,53	35,91
4300	22,46	11,27	40,86	20,04	74,63	35,25
4400	22,18	11,10	40,35	19,71	73,77	34,61
4500	21,90	10,93	39,88	19,40	72,95	33,99
4600	21,64	10,77	39,42	19,10	72,16	33,38
4700	21,39	10,62	38,97	18,80	71,39	32,79
4800	21,14	10,47	38,55	18,51	70,67	32,20
4900	20,90	10,33	38,14	18,22	69,97	31,63
5000	20,68	10,18	37,74	17,94	69,31	31,08

**TABLA 4-I: Radio del sector VS Tasa binaria neta y útil (800 MHz)**

Mientras que para la banda de 2600 MHz la tabla es la siguiente:

<b>Freq=2.6GHz</b>	<b>BW=5 MHz</b>		<b>BW=10 MHz</b>		<b>BW=20 MHz</b>	
<b>Radio del sector(m)</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>	<b>TB neta</b>	<b>TB útil</b>
1000	27,00	12,67	54,00	25,34	108,00	50,54
1100	27,00	12,75	54,00	25,45	108,00	50,67
1200	26,53	12,62	53,06	25,24	106,11	50,43
1300	26,22	12,41	52,10	24,75	103,49	49,36
1400	26,16	12,30	51,88	24,47	102,21	48,60
1500	26,09	12,20	51,61	24,25	101,40	48,01
1600	26,00	12,12	51,31	24,04	100,51	47,51
1700	25,90	12,03	50,99	23,84	99,59	47,00
1800	25,79	11,95	50,64	23,65	98,68	46,44
1900	25,66	11,87	50,27	23,46	97,77	45,91
2000	25,52	11,81	49,89	23,26	96,86	45,37
2100	25,38	11,76	49,50	23,04	96,00	44,73
2200	25,22	11,70	49,11	22,82	95,15	44,12
2300	25,07	11,64	48,73	22,62	94,35	43,53
2400	24,91	11,57	48,35	22,41	93,59	42,87
2500	24,74	11,50	47,99	22,17	92,87	42,23
2600	24,58	11,42	47,63	21,93	92,17	41,57
2700	24,42	11,34	47,29	21,70	90,84	40,79
2800	24,26	11,26	46,97	21,45	89,11	39,94
2900	24,10	11,16	46,65	21,19	87,47	39,13
3000	23,95	11,06	46,35	20,93	85,91	38,32
3100	23,80	10,96	46,06	20,66	84,41	37,54
3200	23,66	10,86	45,50	20,33	83,00	36,80
3300	23,52	10,75	44,77	19,98	81,65	36,10
3400	23,39	10,65	44,06	19,65	80,39	35,44
3500	23,26	10,54	43,39	19,32	79,18	34,78
3600	23,14	10,43	42,75	18,98	78,04	34,12
3700	23,02	10,31	42,12	18,66	76,94	33,49
3800	22,77	10,18	41,53	18,35	75,89	32,90
3900	22,46	10,03	40,97	18,06	74,91	32,33
4000	22,16	9,88	40,42	17,78	73,96	31,73
4100	21,87	9,75	39,90	17,51	73,06	31,17
4200	21,59	9,60	39,40	17,23	72,21	30,63
4300	21,32	9,46	38,93	16,96	71,38	30,08
4400	21,06	9,33	38,47	16,70	70,59	29,55
4500	20,81	9,20	38,03	16,45	69,84	29,03
4600	20,57	9,08	37,61	16,21	69,12	28,52
4700	20,34	8,96	37,21	15,97	68,42	28,03
4800	20,12	8,84	36,82	15,72	67,76	27,53
4900	19,90	8,73	36,44	15,49	67,12	27,05
5000	19,69	8,61	36,08	15,26	66,46	26,59

**TABLA 4-II: Radio del sector VS Tasa binaria neta y útil (2600 MHz)**

Como ejemplo de utilización de la tabla, se elige particularizar el ejemplo en el trayecto real entre Madrid - Ciudad Real y el trayecto Madrid – Valladolid. Con esto se podrá calcular de manera aproximada el coste de introducir LTE a unos requisitos determinados:

- Madrid – Ciudad Real: La distancia a cubrir es de unos 170,1 kilómetros entre ambos puntos. Suponiendo que el futuro diseñador necesita utilizar la banda de 2600 MHz y tiene como requisito disponer de una tasa binaria media útil de 45 Mbps se obtendría la siguiente solución:

Según estos datos y siguiendo los datos de la Tabla 4-II se tendría que hacer un radio de sector inferior a los 2000 metros:

Freq=2.6GHz	BW=5 MHz		BW=10 MHz		BW=20 MHz	
Radio del sector(m)	TB neta	TB útil	TB neta	TB útil	TB neta	TB útil
1900	25,66	11,87	50,27	23,46	97,77	45,91
2000	25,52	11,81	49,89	23,26	96,86	45,37
2100	25,38	11,76	49,50	23,04	96,00	44,73
2200	25,22	11,70	49,11	22,82	95,15	44,12

**TABLA 4-III: Solución Madrid – Ciudad Real**

Aplicado a un trayecto de 171,1 km se necesitarían 86 antenas que con un precio de aproximadamente 224€ por antena sale un total de 19264€ de coste. El precio de la antena se obtiene de una antena real en la web de suministro <http://www.broadbandbuyer.co.uk/>

- Madrid – Valladolid: En este caso la distancia a cubrir son 179,6 kilómetros. Suponiendo que el diseñador tiene como requisitos una tasa binaria neta útil de 25 Mbps en la banda de 0.8 GHz el resultado sería el siguiente:

En este caso, el diseñador seguiría la Tabla 4-I y le arrojaría una distancia de 3000 metros con un ancho de banda de 10 MHz:

Freq=0.8GHz	BW=5 MHz		BW=10 MHz		BW=20 MHz	
Radio del sector(m)	TB neta	TB útil	TB neta	TB útil	TB neta	TB útil
2900	25,39	13,49	48,88	25,39	92,21	46,47
3000	25,20	13,35	48,51	25,02	90,50	45,48
3100	25,03	13,21	48,16	24,66	88,89	44,50

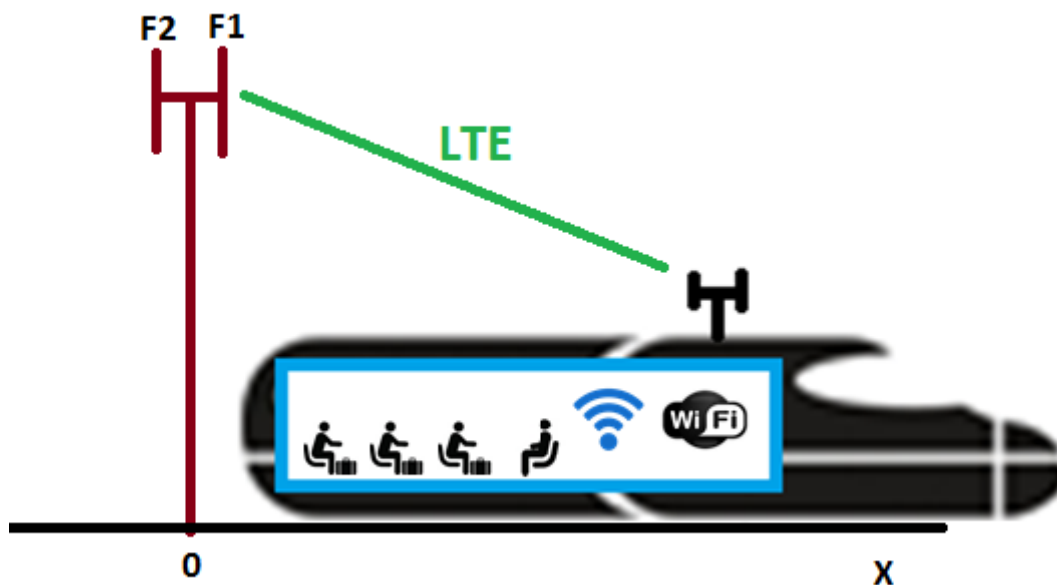
**TABLA 4-IV: Solución Madrid – Valladolid**

Aplicando el resultado de radio de sector mínimo a la distancia a cubrir se obtiene que se necesitarían 60 antenas, a un precio de 224€ cada antena, hace un total de 13440€. Nuevamente el precio de la antena se obtiene de una antena real en la web de suministro <http://www.broadbandbuyer.co.uk/>

### 4.3 Distribución de la señal en el interior del vagón

Antes de entrar en tema, es conveniente explicar el por qué aparece este apartado en este capítulo y seguido de la segmentación de resultados. Primeramente, a pesar de que el título y la temática de este trabajo sea “*LTE para trenes de alta velocidad*” se consideró importante añadir un apartado que tratase la distribución de la señal dentro del tren para el usuario final del servicio. Este es un asunto al que podría dedicársele un TFM completo para poder obtener unos resultados tangibles, precisos y adecuados. Es por esto, que en este apartado simplemente se pretende proponer una posible solución a este problema para que pueda servir como punto de partida para futuras investigaciones.

La solución que se propone para la distribución en el interior es aplicar la tecnología WiFi. Esta es una tecnología, de sobra conocida por todos, que se basa en un mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica. Actualmente es el método más utilizado en redes públicas y privadas para la conexión a Internet en redes de banda ancha. Su uso cada vez es más común y cada vez se encuentra en más partes implementado. De hecho, su uso cada vez es más común en medios de transporte que compiten con los trenes de alta velocidad como son los aviones y coches. Dichos sistemas son diferentes en cuanto a la conexión *Downlink* y *Uplink* respecto a lo que se propone para trenes de alta velocidad, pero la distribución en el interior se hace por igual con redes WiFi. El esquema del sistema sería:



4-XII: Esquema sistema LTE+WiFi

Las razones principales por las que se ha escogido WiFi son las siguientes:

- Es una tecnología madura que se utiliza de manera amplia en todo el mundo en la mayoría de las redes de banda ancha. Esto va a permitir que en cualquier parte del mundo podremos utilizar la tecnología WiFi con una compatibilidad absoluta
- Permite capacidades reales superiores a los 600Mbps en función del estándar usado en el sistema. WiFi dispone de varios estándares que han ido evolucionando a lo



largo de los años y que permiten un rendimiento de pico máximo según el estándar que se escoja.

En el apartado [4.2.4](#) se ha visto que la tasa binaria útil real máxima en el mejor de los casos es de aproximadamente unos 61,4 Mbps, esto nos dice que necesitaríamos un estándar de Wifi que pueda ser capaz de distribuir una capacidad equivalente. WiFi dispone de los siguientes estándares:

Estándar	Velocidad máxima real aproximada
IEEE 802.11	1 Mbps
IEEE 802.11a	27 Mbps
IEEE 802.11b	5,5 Mbps
IEEE 802.11g	27 Mbps
IEEE 802.11n	300 Mbps
IEEE 802.11ac	650 Gbps

**TABLA 4-V: Estandares de WiFi**

Por lo tanto, siguiendo la tabla anterior, se estima que se necesita un sistema WiFi que soporte el estándar 802.11n como mínimo pudiéndose elegir también el 802.11ac para no degradar el rendimiento pico del sistema LTE.

- Al ser inalámbrico, la comodidad que ofrecen es muy superior a las redes cableadas porque cualquiera que tenga acceso a la red puede conectarse desde distintos puntos dentro del tren con la posibilidad de moverse entre vagones.
- Elimina pérdidas relativas al paso de señal a través del metal. Si en lugar de hacer una recepción en la parte superior del tren con una posterior distribución de señal con WiFi se optase por hacer una conexión directa entre usuario y estación base se tendrían unas pérdidas considerables al tener que pasar la señal a través del metal del tren.

Conocidas las razones de por qué usar WiFi y los estándares óptimos, el siguiente paso es ver cómo debería funcionar el sistema. En primera instancia, en el camino hacia abajo o Downlink, se transmitiría la señal LTE hasta la antena colocada en la parte superior del tren, tal y como se ha comentado a lo largo del documento. Una vez recibida, el sistema WiFi tendría que encapsular y empaquetar el contenido útil de LTE y adaptarlo al protocolo utilizado por éste para una posterior distribución. Por otro lado, tendría que ser capaz de hacer el camino inverso, es decir, si un usuario manda información al router mediante el estándar WiFi, el sistema tendría que ser capaz de extraer la información útil y encapsularla para transmitirla mediante LTE hacia la estación base. Es decir, esto implicaría un tratamiento de la información en las capas física y de enlace del sistema.

En cuanto a la colocación de los routers o puntos de acceso a WiFi dentro de los vagones se debería estudiar en función de la calidad de cobertura que se quiera disponer y del número de antenas LTE que se tengan por vagón. Esto implicaría estudiar, entre más

factores, las interferencias entre routers y pérdidas de la señal dentro del vagón según la calidad que se quiera en cada punto del tren.

#### **4.4 Conclusiones**

Comprobado que el Software de simulación básico verdaderamente funciona según lo esperado, se ha podido adaptar y emplear como herramienta básica para estudiar varios casos y extraer resultados. Esto ha permitido tener un análisis mucho más extenso y completo sobre este tipo de escenarios.

Primeramente se ha podido cuantificar cuánto de tasa binaria bruta es en realidad tasa binaria útil para el usuario en recepción. Para llegar a ese paso, era necesario ser lo más riguroso posible a la hora de introducir los factores atenuantes y no escatimar en términos de simulación con ninguno de ellos. Un ejemplo de esto es haber incluido hasta 10 interferencias y comprobar que el resto de interferencias no incluidas (I11, I12 e I13) no alteraban el resultado apenas pudiendo ser eliminadas del análisis.

Posteriormente, con la ayuda de las simulaciones, se ha podido ver que la frecuencia es un factor mucho más decisivo en términos de tasa binaria útil que la velocidad. El resultado de este análisis puede ser realmente útil para personas que se dediquen al futuro diseño de sistemas LTE en trenes de alta velocidad y tengan que elegir en qué priorizar.

Además se ha podido ver cuál es el rendimiento máximo y mínimo del LTE en este tipo de sistemas. Incluso en el peor de los casos se mejora la tasa pico de GSM, por lo que hace que LTE sea una opción más que justificable para sustituirle.

Por otro lado, se han creado unas tablas guía que permiten, de manera rápida y sencilla, obtener el radio máximo del sector según una tasa binaria requerida y viceversa. De nuevo, algo muy útil para futuros diseñadores.

Por último, se ha propuesto la implantación de la tecnología WiFi para la distribución de la señal dentro de los vagones del tren. Con esto se pretende dar un punto de partida para futuras investigaciones en relación a la temática de este trabajo.

## **5 Conclusiones y trabajo futuro**

---

### **5.1 Introducción**

En el último capítulo de este Trabajo Fin de Master se analizará el trabajo realizado y se extraerán las conclusiones finales del documento. Además, se mencionaran los puntos que aún tienen margen para futuras investigaciones y que podrían suponer un punto de partida para otros trabajos, con el fin de ampliar funcionalidad y conocimiento. Esto último se trata en el apartado de Trabajo futuro.

### **5.2 Conclusiones**

El objetivo de este Trabajo Fin de Master era realizar un estudio exhausto de la viabilidad y rendimiento del estándar de comunicaciones LTE en infraestructuras de trenes de alta velocidad, considerando alta velocidad superior a los 250 km/h. El resultado, en grandes rasgos, ha sido la creación de un software que ha conseguido simular el transcurso del tren dentro de un sector 4G con sus respectivos resultados permitiendo a posteriori realizar el análisis.

Primeramente se hizo necesario un estudio de estándares de comunicaciones previos. Este estudio permitió tener una base sólida de conocimiento sobre cómo se llegó al estándar de cuarta generación pudiendo ver una evolución a lo largo de la historia de las comunicaciones. Además, indagando en el estado del arte del tema, se consiguió encuadrar el trabajo a realizar y conocer estudios que se habían hecho con anterioridad. Dicho estudio posibilitó ver que las comunicaciones móviles en trenes de alta velocidad están realmente anticuadas y que hay mucho margen de mejora en este campo. Esto último hizo vislumbrar que verdaderamente podría ser útil la realización de este documento.

Con las bases asentadas y los objetivos bien definidos, se pasó directamente al estudio del estándar principal en este trabajo, LTE. Lo primero fue conocer a fondo LTE y establecer los parámetros que verdaderamente podrían afectar al futuro desarrollo. Para ello se hizo necesaria una investigación sobre cómo funciona 4G y qué características tiene. En paralelo existía la necesidad de saber en detalle qué era un tren de alta velocidad y que características podrían afectar al desarrollo de la simulación.

Conocido lo anterior y ya apuntando a la idea de obtener un rendimiento tangible, se optó por utilizar el SINR como medio para obtener la tasa binaria. Esto implicó seleccionar todo el conjunto de fenómenos y factores que pudiesen afectar, tanto positiva como negativamente a la señal. El criterio fue seleccionar todos aquellos que afectasen de una manera sensible a la calidad de la señal con el fin de obtener unos resultados lo más parecidos a la realidad posible.

Posteriormente se desarrolló el software de simulación. En primera instancia se quiso implementar un software que fuese básico pero que fuese realmente preciso, es decir, buscando una buena calidad en los resultados. Conseguida una calidad alta se pasó a aumentar el grado del software desarrollado y se incrementó su funcionalidad mediante la aplicación a casos concretos para obtener resultados y medidas que se consideran importantes.

Con todo lo anterior, se puede concluir que con todo el conjunto de resultados y estudios arrojados en este documento, se muestra y cuantifica el posible rendimiento y capacidad

del 4G en trenes de alta velocidad, tanto para el mejor de los casos como en el peor, teniendo en cuenta variables como la velocidad y la frecuencia. Además, gracias al estudio y simulación, se posibilita a futuros diseñadores tener de referencia este documento a la hora crear redes de 4G en estructuras ferroviarias de alta velocidad. Para ello se han creado unas tablas que pueden servir de referencia para conocer el radio de actuación de la antena y con esto, el número de antenas necesario, además de mostrar información sobre rendimientos y tasas a lo largo del documento.

Finalmente, se concluye que la realización de este trabajo ha permitido implementar un software suficientemente preciso que ha posibilitado un estudio teórico completo de la viabilidad del estándar de cuarta generación en trenes de alta velocidad además de cuantificar su potencial en cuanto a capacidad con su posterior análisis. En cuanto a lo personal, durante el transcurso en su realización, se ha extraído una experiencia realmente enriquecedora. Se ha aprendido en profundidad sobre las redes de comunicaciones así como de sus estándares, en concreto LTE, y ha permitido tener una visión general sobre las investigaciones que se encaminan en estos temas y cuáles son los caminos potenciales para evolucionar.

Pero aun así, queda mucho camino por recorrer en este tema y mucho margen de mejora. En el apartado siguiente se proponen posibles líneas de investigación que serían continuación o que tendrían relación con el trabajo realizado.

### **5.3 Trabajo futuro**

Para incrementar el conocimiento sobre LTE como posible estándar de comunicaciones en trenes considerados de alta velocidad se deja una posible lista de trabajos o líneas de investigación a realizar en el futuro. Entre ellos se encuentran:

- Estudio en escenarios reales implicando LTE y trenes de alta velocidad. Los resultados obtenidos mediante simulaciones de este documento se podrían contrastar con medidas reales en escenarios bajo prueba.
- Uno de los objetivos principales de este documento ha sido cuantificar la tasa binaria útil mediante la simulación del transcurso de la señal desde la antena emisora en la estación base hasta la antena receptora en el techo del tren. Una posible continuación es, con los resultados de este documento, simular y estudiar la mejor manera para distribuir la señal dentro del vagón y saber cuánta señal llega a cada punto del vagón en diversos escenarios. En este documento se propone la tecnología Wifi.
- Creación de una interfaz de usuario para el software básico desarrollado con el fin de hacer intuitiva la inserción de parámetros a la hora de realizar simulaciones y obtener resultados. Esto podría ser útil para posibles diseñadores de las redes de comunicaciones e incluso para una posible comercialización del software.
- Sofisticación del software implementado mediante la inserción de elementos geográficos (como podrían ser árboles, edificios, montañas) o inherentes a la vía (viaductos, túneles, elevaciones).

- Aplicación del software en un recorrido real punto a punto para la obtención de resultados en cada uno de los tramos. Esto podría hacerse conociendo las ubicaciones de las estaciones base en el recorrido elegido para conocer distancias reales entre ellas y determinar así el radio real. Con esto se podría conocer si sería necesaria una reubicación de las estaciones o si se podrían reciclar según requisitos de tasa binaria y frecuencia. Para esta simulación haría falta una computadora realmente potente debido a la alta carga computacional que conllevaría dicha tarea.



# Referencias

---

- [1] Recommendation GSM 04.08”, European Telecommunications Standards Institute (ETSI).
- [2] “The Mobile Economy” GSMA, 2015.
- [3] Ficha técnica AVE Serie 102 / 112.
- [4] “Comunicaciones móviles 1G”, disponible en <http://wikitel.info/>.
- [5] “UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)”, 3GPP.
- [6] Patricio López González, “Aportación al diseño e implementación de los Turbo Decodificadores”, TFM en Universidad de Sevilla, 2011.
- [7] Sonia Rathi, Nisha Malik, Nidhi Chandal y Sukhvinder Malik, “Throughput for TDD and FDD 4G LTE Systems”.
- [8] “Los 10 trenes de alta velocidad más rápidos en Europa”, 2014. Disponible en <http://www.fierasdelaingenieria.com/>
- [9] “Los trenes más rápidos del mundo actualmente en servicio”, 2013. Disponible en <http://www.fierasdelaingenieria.com/>
- [10] Jaime Calle-Sanchez, Mariano Molina-García “Long Term Evolution in High Speed Railway Environments: Feasibility and challenges” Bell Labs Technical Journal 18, 2013.
- [11] Binghao Chen, Bo Ai, Zhangdui Zhong, “Channel characteristics in high-speed railway”, IEEE Vehicular Technology Magazine, June 2015.
- [12] Bazil Taha Ahmed, “WCDMA Multiclass Downlink Capacity and Interference Statistics of Cigar-Shaped Microcells in Highways”.
- [13] “A CoMP soft handover scheme for LTE systems in high speed railway” Wantuan Luo, Ruiqiang Zhang





## Glosario

---

LTE	Long Term Evolution
1G	Primera generación
2G	Segunda generación
3G	Tercera generación
4G	Cuarta generación
GSM	Global System for Mobile communications
GSM-R	Global System for Mobile communications – Railways
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
SMS	Short Message Service
MMS	Multimedia Message Service
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
TDD	Time-Division Duplexing
FDD	Frequency-Division Duplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
QoS	Quality of Service
FEC	Forward Error Correction
LDPC	Low Density Parity Check
MCS	Modulation Coding Scheme
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
AVE	Alta Velocidad Española
RENFE	Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles
SLL	Side Lobe Level
SNR	Signal Noise Ratio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio



# Anexo I: Frecuencia Doppler en función de la banda y velocidad

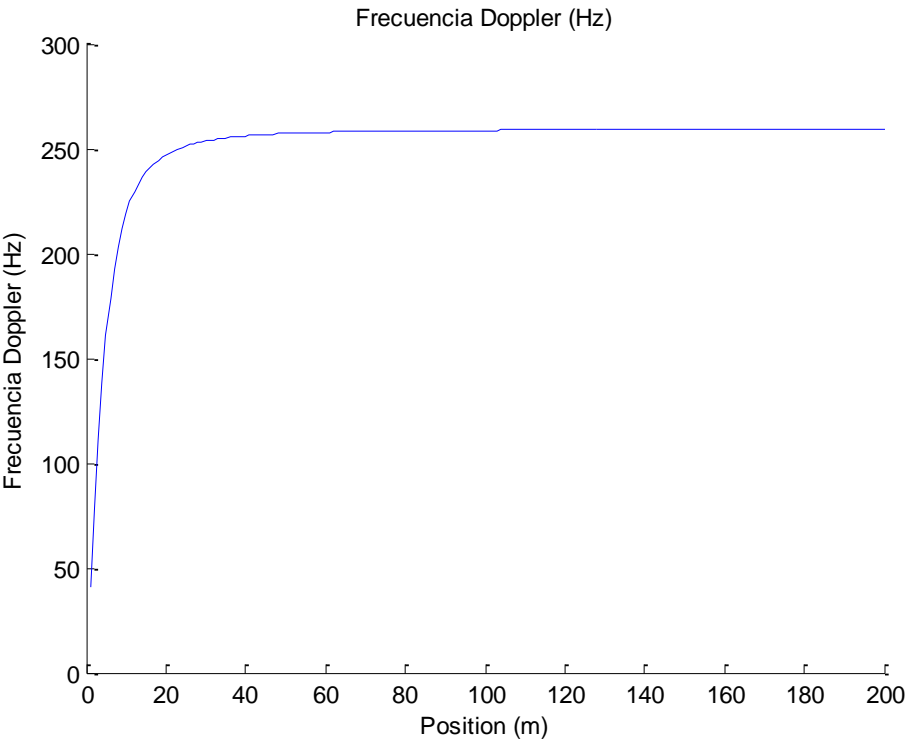


Ilustración 1: Frecuencia Doppler 0.8GHz y 350km/h

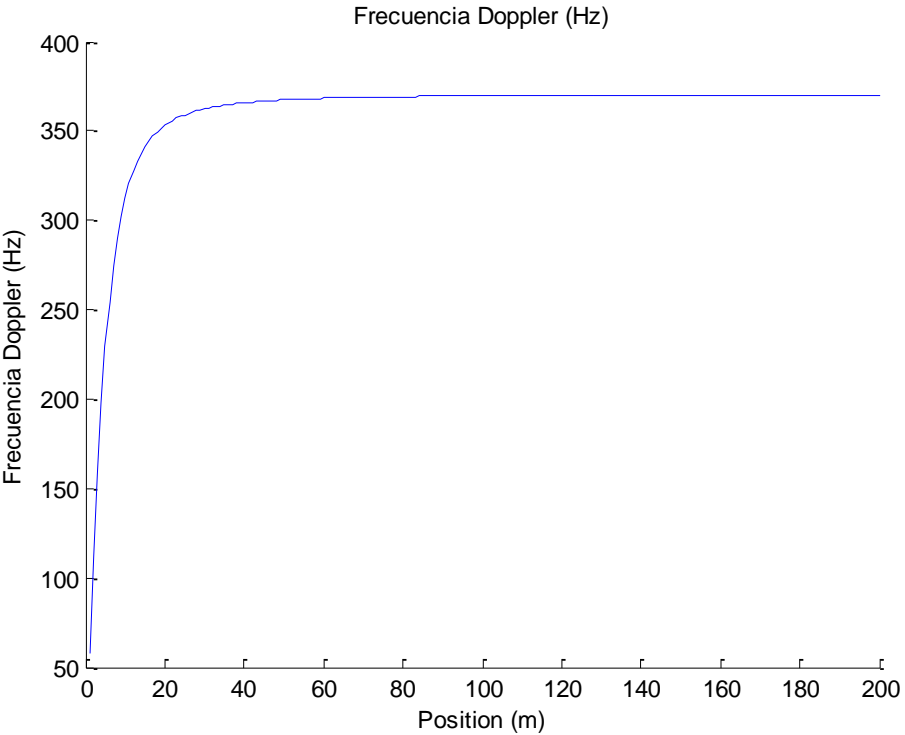
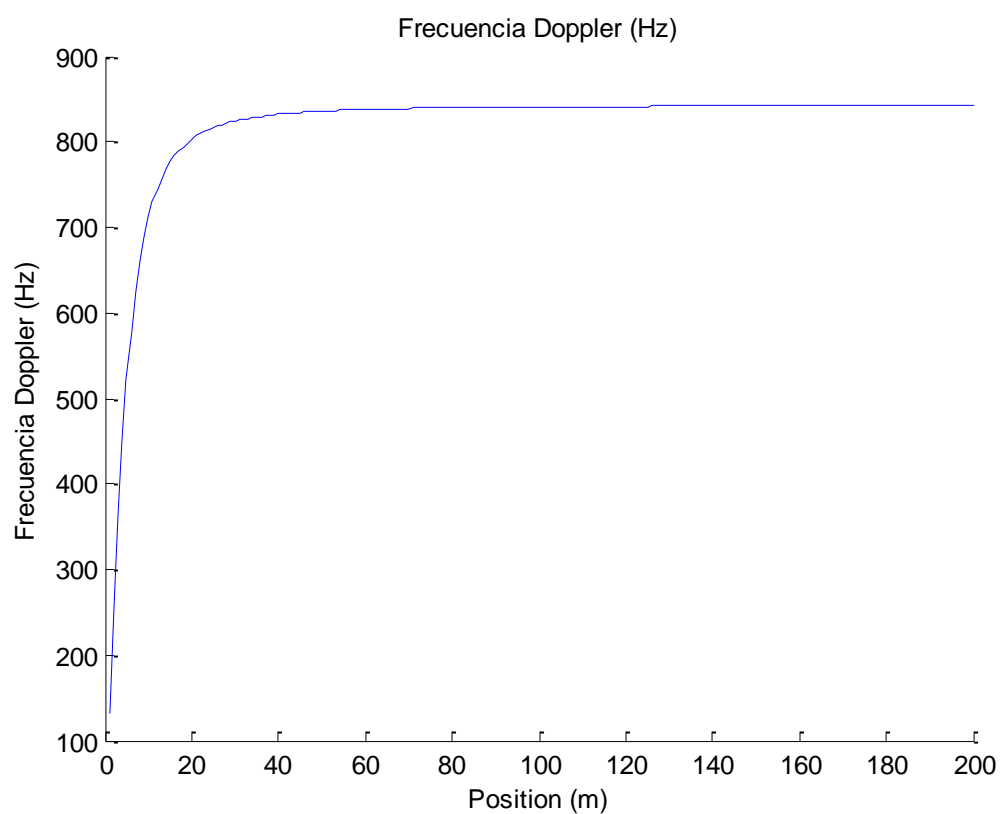
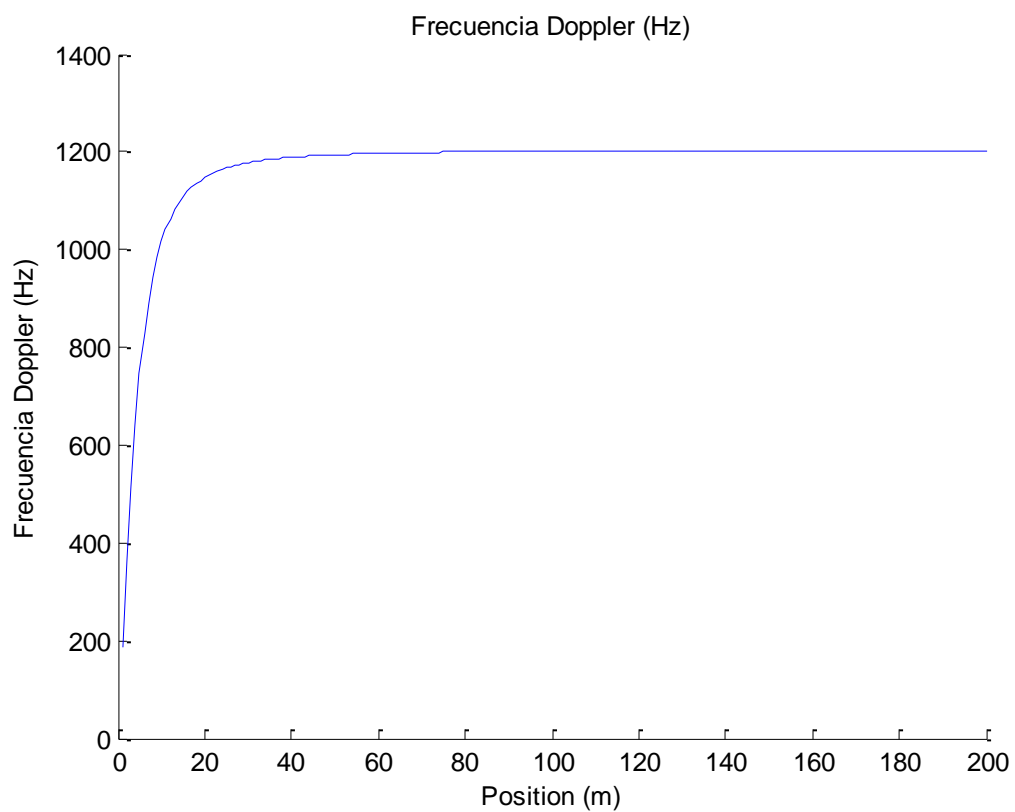


Ilustración 2: Frecuencia Doppler 0.8GHz y 500km/h



**Ilustración 3: Frecuencia Doppler 2.6 GHz y 350km/h**



**Ilustración 4: Frecuencia Doppler 2.6 GHz y 500km/h**

## Anexo II: Antenas de ejemplo disponibles actualmente en mercado para emisión y recepción en banda de 2.6GHz

### 1. Antena de la estación base o emisión:

Fuente: [www.L-com.com](http://www.L-com.com)

www.L-com.com

#### HyperLink Wireless 2.6 GHz MMDS 14 dBi Wireless LAN Flat Patch Antenna Model: HG2614P

**Applications and Features**

**Applications:**

- IEEE 802.16 and 802.20
- WiMAX Technology
- Non-Direct Line of Sight (NLOS)
- Wireless Internet Service Providers (WISP)
- Compatible with Navini™ Ripwave® (MCX-Plug pigtail required)

**Features:**

- Light weight durable UV-stable, UL flame rated radome
- Low loss solid brass elements
- DC Short lightning protection
- 12 inch coax lead
- Can be installed for either vertical or horizontal polarization



#### Electrical Specifications

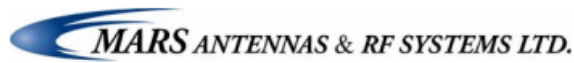
Frequency	2500-2700 MHz
Gain	14 dBi
Horizontal Beam Width	30 degrees
Vertical Beam Width	30 degrees
Impedance	50 Ohm
Max. Input Power	25 Watts
VSWR	< 1.5:1 avg.
Lightning Protection	DC Short

#### Mechanical Specifications

Weight	.95 lbs. (.43 Kg)
Dimensions	8.5 x 8.5 x 1 (inches) 216 x 216 x 26 (mm)
Radome Material	UV-inhibited Polymer
Flame Rating	UL 94HB
Mounting	Four ¼ in. (6.3 mm) Holes
Polarization	Horizontal or Vertical
Operating Temperature	-40° C to to 85° C (-40° F to 185° F)
Wind Survival	>150 MPH (241 KPH)

## 2. Antena del tren o de recepción:

Fuente: [www.mars-antennas.com](http://www.mars-antennas.com)



### MA-WO25-CT

#### Blade Antenna for Mobile Applications

MARS WiMax 2.3-2.6 GHz Car Antenna provides a cost effective and aesthetic solution for LTE & WiMax applications.

Additional Features:

- External car antenna with magnetic or fixed mount.
- Easy and fast installation.
- Consistent and steady performance.
- Small and unobtrusive design.



#### Specifications

##### *Electrical*

Frequency range	2.3-2.6 GHz
GAIN, min.	4 dBi
VSWR, max.	1.5 : 1
Polarization	Vertical
3 dB Beam-Width, H-Plane, typ.	Omni-Directional
3 dB Beam-Width, E-Plane, typ.	30°
Input Impedance	50 Ohm
Input Power	5 Watt

##### *Mechanical*

Dimensions	Height	76 mm
	Base (LxW)	131 x 78 mm
Weight		165 gr.
Connector		SMA Female
Radome		UV Protected Polycarbonate
Water Proofing		IP-67
Mount		See Ordering Options



